

微波低通高阻复合材料构件的设计与性能验证

黄大庆 康飞宇 周卓辉 刘翔 程红飞

Design and verification of microwave low frequency band-pass and high frequency band-stop composite structure

Huang Da-Qing Kang Fei-Yu Zhou Zhuo-Hui Liu Xiang Cheng Hong-Fei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 188401 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.188401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.188401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于石墨烯纳米带的齿形表面等离子激元滤波器的研究

[Tooth-shaped plasmonic filter based on graphene nanoribbon](#)

物理学报.2015, 64(10): 108402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108402>

基于无源超高频射频识别标签的湿度传感器设计

[Complementary metal-oxide-semiconductor humidity sensor design for passive ultra-high frequency radio-frequency identification application](#)

物理学报.2014, 63(18): 188402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.188402>

基于离散粒子群算法的频率选择表面优化设计研究

[Study on the optimal design of frequency selective surfaces based on the discrete particle swarm optimization](#)

物理学报.2014, 63(13): 138401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.138401>

具有陡降特性的新型混合单元频率选择表面

[A novel frequency selective surface of hybrid-element type with sharply decreased stop-band](#)

物理学报.2014, 63(7): 078402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.078402>

近地面三阵子天线估计电磁波到达角和极化参数

[Direction of arrival of EMW and polarization parameter estimation using tripole near the earth surface](#)

物理学报.2013, 62(19): 198402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.198402>

微波低通高阻复合材料构件的设计与性能验证*

黄大庆^{1)2)†} 康飞宇¹⁾ 周卓辉²⁾ 刘翔²⁾ 程红飞²⁾

1) (清华大学材料学院, 北京 100084)

2) (中航工业北京航空材料研究院, 北京 100095)

(2015年4月8日收到; 2015年7月13日收到修改稿)

随着海洋环境武器装备隐身发展的需要, 开展具有微波低通高阻特性的复合材料构件设计与研究显得重要而迫切. 文章首先设计了一种中空六边形周期性结构, 以此为基础设计了一个由面层、中空六边形环周期层1、中间层、中空六边形环周期层2、面层组成的新型复合双层频率选择表面(FSS)结构件. 其上层FSS的结构参数为中空六边形环边长3.0 mm, 线宽度0.5 mm, 缝隙宽度0.4 mm; 下层FSS的结构参数为中空六边形环的边长3.2 mm, 线宽度0.5 mm, 缝隙宽度1.0 mm. 模拟结果表明: 该复合材料构件具备优良的低频透过性与高频屏蔽性快速转换的特性, 能够获得优异的低通高阻性能, 同时在 45° 范围内具备优良的角度不敏感性. 最后制备和实验验证得到了0—2 GHz低频段具有95.6%高透过性、同时在7.05—18 GHz高频段具有10 dB以上屏蔽性能的复合材料构件, 对具有隐身特性的新型滤波电磁功能构件的研制具有重要价值.

关键词: 低频带通, 高频带阻, 频率选择表面, 隐身**PACS:** 84.30.Vn, 84.40.-X, 41.20.Jb**DOI:** 10.7498/aps.64.188401

1 引言

频率选择表面(frequency selective surfaces, FSS)是一种二维周期性结构, 由大量单元按二维周期性方式排列而成^[1], 这种周期性结构会对处于谐振频率周围的电磁波有全反射(贴片型)或者全透射(孔径型)的特性^[2,3]. 频率选择表面所呈现的这种在开放空间的电磁波滤波器功能, 使其不仅在科学领域具有重要研究意义, 而且在工程领域也具有重要应用价值, 一直是微波以及材料领域的一个重要研究方向^[4,5].

在对FSS结构不断深入研究的过程中, 提出了各种不同类型的FSS结构单元, 如圆环单元、十字单元、手性超表面等^[6-8]. 随着应用范围的拓展, 新的结构单元以及新的滤波机理仍处在不断研究和发展之中. 王岩松等^[9]研究了具有陡降特性的混合单元频率选择表面, 通过在开孔单元周围增加条形孔, 实现更陡峭的过渡带和更低的阻带透过

率. 于淼等^[10]提出了一种基于混合周期栅网结构的频率选择表面, 实现毫米波带通情形下的红外高透过性能. 随着海洋环境下大型武器装备隐身发展的需要, 雷达设备上所覆盖的罩体材料需要在低频段具备优良的透波性能, 同时高频段需要具备优良的屏蔽隐身性能, 因此, 开展微波低通高阻特性的复合材料构件的设计与研究显得尤为重要而迫切^[11,12].

本文首先设计了一种中空六边形频率选择表面, 以此为基础设计了一种具有优秀低通高阻性能的新型双层复合FSS结构件, 通过仿真和实验相结合的方式对该新型双层结构的微波低通高阻性能进行了研究, 对具有隐身特性的新型滤波复合材料制件的研制与发展具有重要意义.

2 FSS结构设计

一般来说, 贴片型FSS结构具有带阻滤波特性, 而孔径型FSS结构具有带通滤波特性. 本文需

* 北京市科委重大研究项目(批准号: D14110300240000)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hdqbiam@163.com

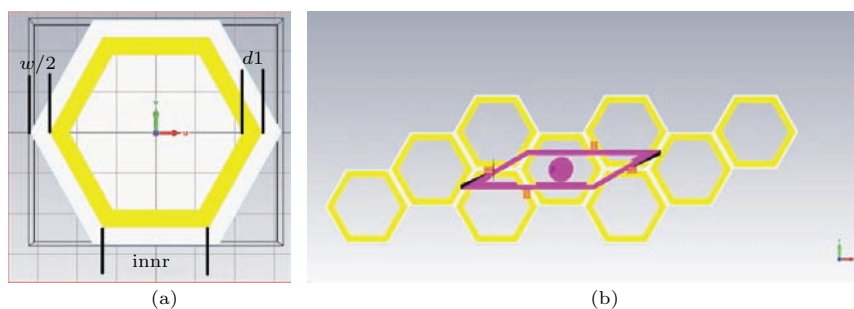


图1 (网刊彩色) 中空六边形结构单元及其排列方式 (a) 结构单元; (b) 排列方式

Fig. 1. (color online) Hollow hexagon structure and its periodic array: (a) Structure unit; (b) periodic array.

要设计一种在0—2 GHz低频段为通带、8—18 GHz高频段为阻带的FSS结构, 显然单一的贴片型FSS以及单一的孔径型FSS都不能满足此设计要求. 因此, 通过大量探索性设计, 初步确定设计了一种中空的贴片型FSS结构, 如图1所示.

图1中黄色部位为铜介质, 白色部分为真空介质, 中空六边形结构采用蜂窝布阵方式, FSS结构的尺寸为: 边长 $innr = 4$ mm、缝宽 $w = 0.5$ mm、线宽 $d1 = 0.5$ mm. 采用CST Microwave Studio对其进行了仿真, 在无介质加载前提下, 获得其透射系数 S_{21} 参数的仿真结果如图2所示.

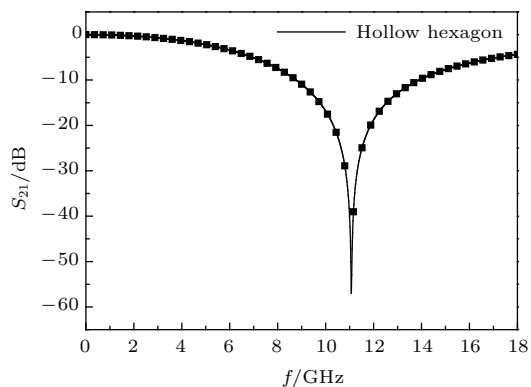

 图2 中空六边形格子的 S_{21} 模拟曲线

 Fig. 2. Simulation S_{21} of hollow hexagon array.

从图2曲线可以看出, 单层中空六边形蜂窝阵列这种周期性结构可以实现低通高阻的滤波效果. 通过对其与电磁波的相互作用的分析可以看出, 在低频点(如2 GHz)时, 结构单元的尺度远小于波长, 相应的电磁响应远偏离谐振区, 金属结构中的电子在电磁波的作用下做同相运动, 如图3(a)所示, 因此表现出良好的电磁传输性能; 当入射电磁波频率逐步增大时, 金属结构的电磁响应进入谐振区(如17 GHz时), 金属结构上表面电流在电磁波的作用下做强烈的反相运动, 如图3(b)所示, 导致入射电磁波被强烈反射, 从而在高频段的传输性能较差.

中空六边形结构与不同频率电磁波相互作用表现出的不同传输特性为低通高阻滤波特性FSS设计提供了理论基础^[13].

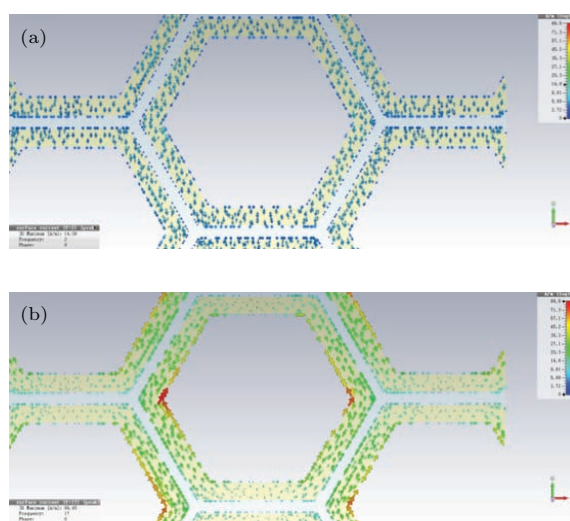


图3 (网刊彩色) FSS在不同频点的表面电流分布 (a) 2 GHz; (b) 17 GHz

Fig. 3. (color online) Surface current distribution of FSS at different frequency: (a) 2 GHz; (b) 17 GHz.

但是, 从图2也可看出, 结构尺寸参数的变化可以调节该周期结构的低通高阻性能特征. 因此, 通过单元尺寸以及周期性尺寸上的调整, 对其进行了进一步的优化设计, 最后得到了优化的结构参数如下: $innr = 2.7$ mm, $d1 = 0.5$ mm, $w = 0.15$ mm. 模拟结果显示, 在低频0—2 GHz频段的透过性不低于83%, 高频8—18 GHz屏蔽性能大于10 dB, 如图4所示.

从图4可以看出, 单层频率选择结构单元的优化实际上并不能同时获得优良的低频高透过性以及高频高屏蔽性能. 其原因在于: 从低频的高透过性向高频的高屏蔽性转变过程非常缓慢, 难以获得快速切换, 因此需要从构件结构上进行进一步的设计与优化.

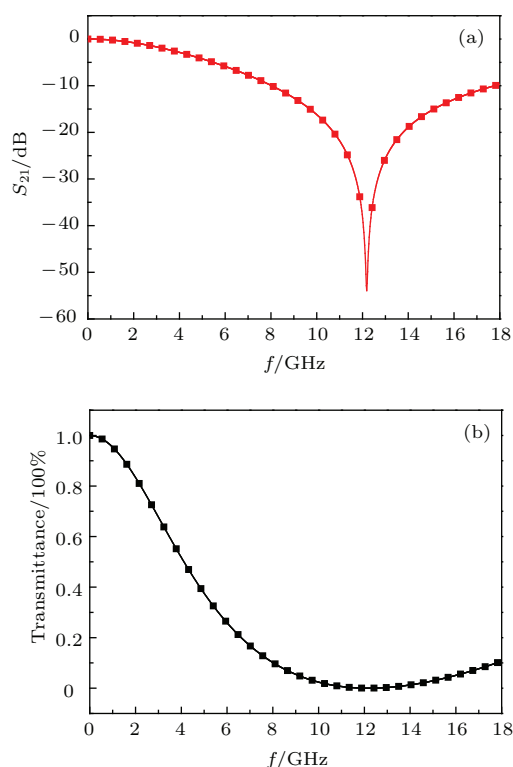


图4 中空六边形周期性结构优化仿真结果 (a)屏蔽性能; (b)透过率

Fig. 4. Optimization simulation results of hollow hexagon: (a) Shielding; (b) transmission.

3 滤波构件的结构化设计

根据武哲等提出的双层FSS结构电性能理论分析方法以及对Y缝隙谐振单元的双层FSS结构的理论分析^[14], 可以利用双层结构的层间电磁场耦合来修正频率响应曲线. 因此, 本文在设计的中空六边形FSS单元的基础上进一步进行了新型双层FSS构件的设计以及微波低通高阻性能的研究.

通过大量的尝试设计模拟, 最后确定的双层FSS结构设计如图5所示.

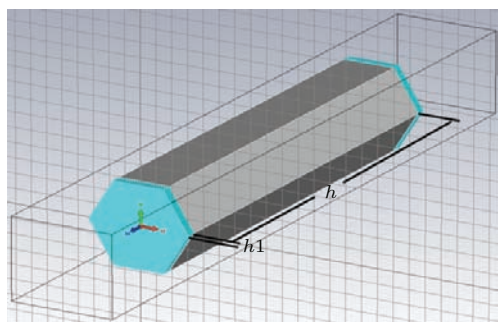


图5 双层FSS结构示意图

Fig. 5. Sketch picture of dual-layers FSS structures.

整个结构按顺序由面层、FSS层、中间层、FSS层、面层组成; 其中FSS层的结构参数为 $innr = 2.7 \text{ mm}$, $d1 = 0.5 \text{ mm}$, $w = 0.15 \text{ mm}$, 即单层FSS优化后的结构参数; 中间层的厚度设置为 h , 面皮层的厚度为 $h1$; 在中间层厚度 h 设为 5 mm , 中间层与面层材料的电磁参数设为真空时, 其模拟仿真结果如图6所示.

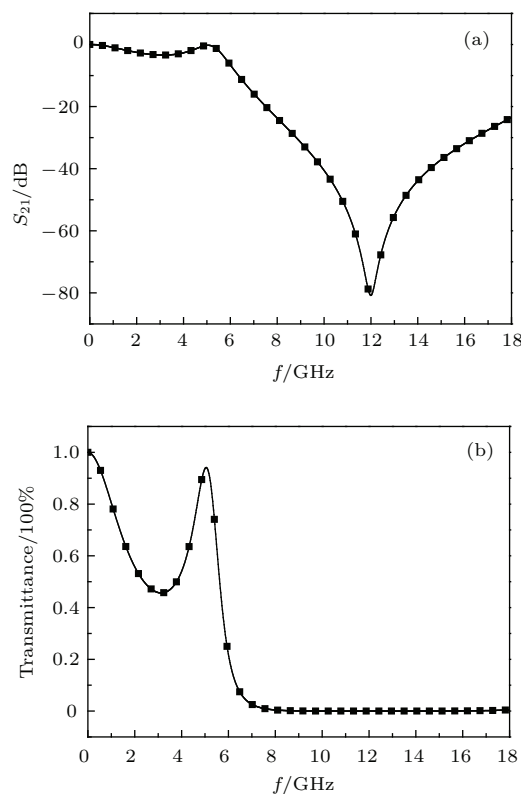


图6 双层FSS结构的电性能 (a)屏蔽性能; (b)透过率

Fig. 6. Electrical performance of dual-layers FSS structure: (a) Shielding; (b) transmission.

与单层FSS结构相比, 双层FSS在通带和阻带之间引入了一个传输峰, 同时还具有更宽的屏蔽带宽; 双层FSS结构的屏蔽峰从 $6.3\text{--}18 \text{ GHz}$ 均实现了 10 dB 以上的屏蔽, 并且从 5 GHz 的 90% 透到 6.3 GHz 的 10 dB 的屏蔽只跨越了 1.3 GHz 带宽, 其随频率转变的特性明显比单层FSS结构好. 分析可以看出, 对于双层的FSS结构, 其两层FSS结构之间可以看成是形成了一个等效的F-B腔, 通过调整两层FSS的间距, 调节F-B谐振频率位于通带和阻带之间, 这样就为同时保证低频优良传输性能以及高频优良屏蔽性能提供了基础^[15].

虽然双层FSS结构提供了低频透过性与高频屏蔽性的快速转换特性, 但是由优化的单层FSS直接构建的双层结构在低频 2 GHz 处的透过率只有 55% . 因此, 需要对单层FSS结构的参数以及双层

FSS结构的几何参数进行优化设计, 调节低频的透过性特征以及高频的屏蔽性特征. 通过一系列的尺寸与结构参数模拟与优化, 最后设计得到了一个由两个不同结构参数的上下双层FSS加载的复合结构件, 如图7所示.

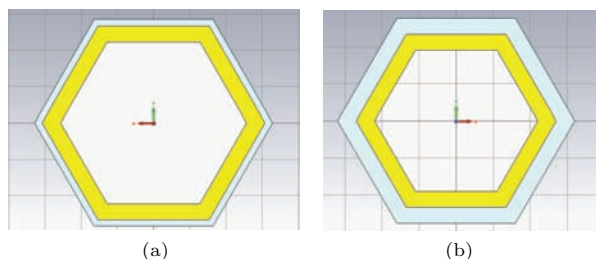


图7 两层不同FSS结构示意图 (a) 上层FSS; (b) 下层FSS

Fig. 7. Sketch diagram of dual-layers FSS with different structural parameters: (a) Up FSS; (b) down FSS.

图7(a)为上层FSS结构, 其结构参数为 $innr = 3$ mm, $d1 = 0.5$ mm, $w = 0.4$ mm; 图7(b)为下层FSS结构, 其结构参数为 $innr = 3.2$ mm, $d1 = 0.5$ mm, $w = 1$ mm. 设中间层厚度 $h = 25$ mm, 则得到优化的双层FSS结构的模拟仿真结果如图8所示.

由图8可以看出, 经过优化设计后, 双层结构实现了低频0—2 GHz频段不低于90%的透过率, 并且从7.5 GHz到18 GHz实现了10 dB以上的宽频屏蔽效果. 可以看出, 模拟结果很好地证明了双层结构具有比单层结构更好的低频透过性以及高频屏蔽性能, 同时, 多屏蔽峰的出现使得2—8 GHz的屏蔽特性也好于单层结构, 为性能更优的低频透过性与高频屏蔽性提供了保障.

以此为基础, 根据工程实际应用需要, 设计中对该新型双层周期性结构的角敏感性也进行了分析, 其仿真结果如图9所示.

从图9可以看出, 低频透过率会随着入射波(TE, 水平极化波)角度的增加呈现下降趋势, 当入射角小于 30° 时, 低频透过率的下降趋势比较缓慢, 从正入射时的92%透过率下降到了 30° 入射时的88%透过率; 当入射角达到 45° 时, 其低频透过率仍然在80%以上, 表现出了很好的斜入射角度稳定性; 当斜入射角度超过 45° 时, 其低频微波的透过性开始受到较大的影响; 而高频的屏蔽性能在整个入射角度变化范围内基本上不受影响, 一直表现出理想的高频屏蔽效果. 因此在实际设计应用中, 可以根据该新型双层FSS结构在垂直入射下的优良

低通高阻特性以及在很宽角度范围内具有角度不敏感性, 进行合理的雷达罩外形结构设计, 有望实现高性能的微波低通高阻功能器件的设计制造.

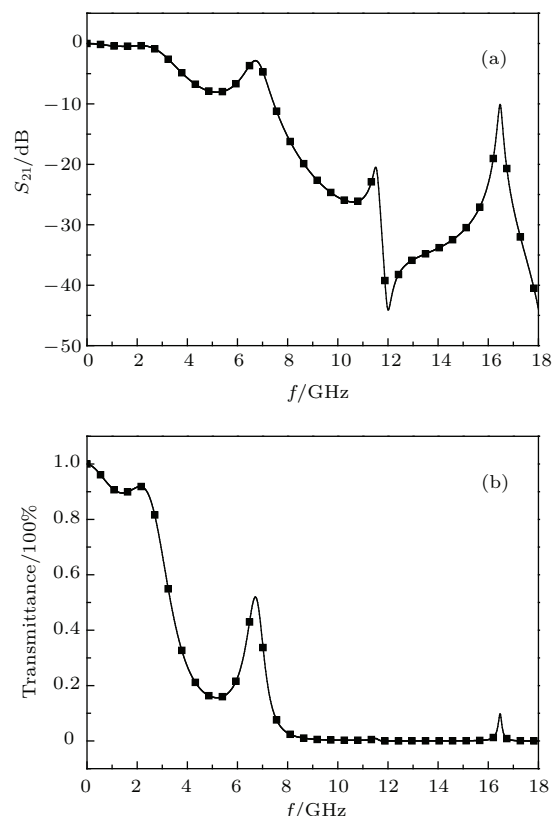


图8 优化设计的双层FSS结构的电性能 (a) 屏蔽性能; (b) 透过率

Fig. 8. Electrical performance of dual-layers FSS with optimization: (a) Shielding; (b) transmission.

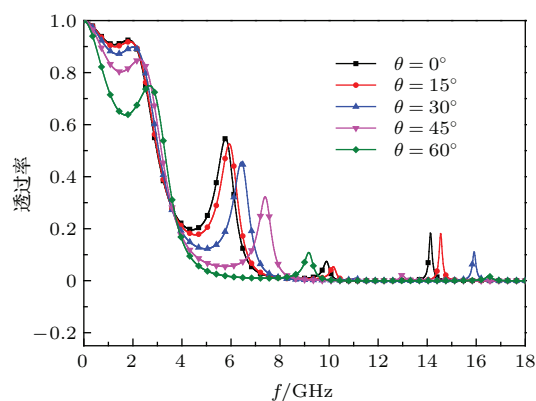


图9 (网刊彩色) 不同入射角对新型双层FSS屏蔽性能的影响(TE)

Fig. 9. (color online) Effect of wave incidence angle (TE) on electrical performance of dual-layers FSS.

总之, 通过新型双层FSS构件的设计, 实现了在0—2 GHz频段范围内90%以上的透过率和在高频6.7—18 GHz频段范围内10 dB以上的屏蔽效果, 并且通过层间电磁场的耦合机理实现了低频透

过性向高频屏蔽性能的快速转换,使构件在整个频段范围呈现出较大的低通与高阻性能上的设计余量,同时在很宽角度范围也展现出优良的角度稳定性,为高性能低通高阻复合材料的设计提供很好的基础.

4 实验验证

根据上述设计结构以及模拟仿真结果,实验上开展了验证研究.采用激光刻蚀技术,在 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 大小的 0.5 mm 厚度FR4基材上刻蚀了所设计的FSS结构单元,采用PMI泡沫芯材作为中间层,采用异氰酸酯树脂和石英布复合材料作为面层,通过热压机采用热压方式制备了微波低通高阻典型件,然后按照GJB6190-2008《电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》标准,在北京航空材料研究院隐身材料重点实验室对其进行了测量,结果如图10所示.

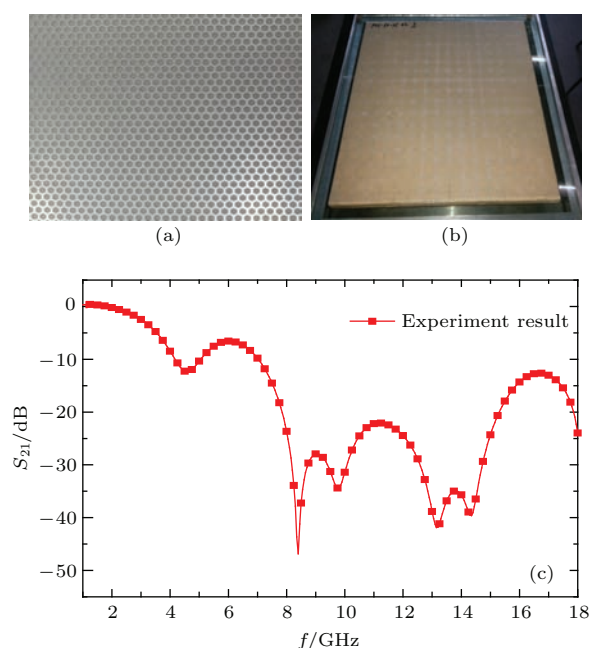


图10 双层复合FSS构件实验的验证结果 (a) FSS单元; (b) 双层FSS构件; (c) 屏蔽透过性曲线

Fig. 10. Experiment results of dual-layers FSS: (a) FSS unit cell; (b) sample; (c) S_{21} of sample.

由实验验证结果可以看出,不同尺寸的双层FSS结构复合制造的复合材料构件的电性能在高频段出现了多个特征性屏蔽峰,与仿真结果一致,整个器件在 $7.05\text{--}18\text{ GHz}$ 宽频范围内实现了大于 10 dB 的屏蔽效果,同时在 $0\text{--}2\text{ GHz}$ 频段也达到了 95.6% 的低频透过率,验证了设计结果并达到了理想的研究目标.

5 结论

本文设计了一种中空六边形周期性结构,实现了 $0\text{--}2\text{ GHz}$ 低频透过性以及 $8\text{--}18\text{ GHz}$ 高频屏蔽性滤波特性目标;通过仿真与优化,得到中空六边形的结构参数为 $innr = 2.7\text{ mm}$, $d1 = 0.5\text{ mm}$, $w = 0.15\text{ mm}$,其低频 $0\text{--}2\text{ GHz}$ 透过率达到 83% ,高频 $8\text{--}18\text{ GHz}$ 屏蔽性能大于 10 dB ;以此为基础,提出了一种加载不同周期结构的双层FSS构件方式,优化获得了一种新型复合双层FSS结构件,其中上层FSS的结构参数为中空六边形环边长 3.0 mm 、线宽度 0.5 mm 、缝隙宽度 0.4 mm ,下层FSS的结构参数为中空六边形环的边长 3.2 mm 、线宽度 0.5 mm 、缝隙宽度 1.0 mm ;通过结构参数优化,获得了低频透过性向高频屏蔽性快速转换的新型功能复合材料,实现了更加优秀的微波低通高阻性能;最后通过实验进行了验证,制备得到了 $0\text{--}2\text{ GHz}$ 低频段具有 95.6% 高透过性,同时在 $7.05\text{--}18\text{ GHz}$ 高频段具有 10 dB 以上屏蔽性能的复合材料构件.研究结果对新型高性能低通高阻构件的研制以及新型滤波特性电磁功能器件的发展具有重要意义.

感谢中国人民解放军空军工程大学理学院屈绍波教授和王甲富博士的讨论.

参考文献

- [1] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface Theory and Design* (New York: Wiley Press)
- [2] Zhang T, Yang G, Li W 2010 *Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2010 9th International Symposium on. IEEE, Guangzhou, 2010 p932
- [3] Zhang J, Gao J S, Xu N X, Yu M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 067302 (in Chinese) [张建, 高劲松, 徐念喜, 于淼 2015 物理学报 **64** 067302]
- [4] Joumayly M A, Behdad N 2010 *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* **58** 4033
- [5] Wang X Z, Gao J S, Xu N X, Liu H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047303
- [6] Salehi M, Behdad N 2008 *Microwave and Wireless Components Letters IEEE* **18** 785
- [7] Li M, Behdad N 2013 *Antennas and Propagation, IEEE Transactions On* **61** 677
- [8] Shi H Y, Li J X, Zhang A X, Wang J F, Xu Z 2014 *Chin. Phys. B* **23** 118101
- [9] Wang Y S, Gao J S, Xu N X, Tang Y, Chen X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 078402 (in Chinese) [王岩松, 高劲松, 徐念喜, 汤洋, 陈新 2014 物理学报 **63** 078402]
- [10] Yu M Xu N X, Gao J S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 030701

- [11] Li C, Jiang D, Zeng J, Xing S, Ju S 2014 *Composites Sci. Technol.* **90** 32
- [12] Choi I, Lee D, Lee D G 2014 *Composite Structures* **117** 98
- [13] Wang X Z 2014 *Ph.D.Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王秀芝 2014 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [14] Wu Z, Wu Z B 2005 *Acta Electron. Sin.* **33** 517 (in Chinese) [武哲, 武振波 2005 电子学报 **33** 517]
- [15] Lan F, Gao X, Qi L M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104209 (in Chinese) [兰峰, 高喜, 齐丽梅 2014 物理学报 **63** 104209]

Design and verification of microwave low frequency band-pass and high frequency band-stop composite structure*

Huang Da-Qing^{1)2)†} Kang Fei-Yu¹⁾ Zhou Zhuo-Hui²⁾ Liu Xiang²⁾ Cheng Hong-Fei²⁾

¹⁾ (School of Material, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

²⁾ (Beijing Institute of Aeronautical Materials AVIC, Beijing 100095, China)

(Received 8 April 2015; revised manuscript received 13 July 2015)

Abstract

It is important and urgent to develop microwave low frequency band-pass and high frequency band-stop composite structures according to the needs of marine environment stealth weapons and equipment constructions. In this paper, a hollow hexagonal periodic structure is originally designed and the microwave band-pass and band-stop characteristics are investigated through the CST software simulation. As an optimization result, the numerical periodic structure parameters of hexagon ring are as follows: hexagon ring side length is 2.7 mm, line width 0.5 mm and gap width 0.15 mm, which shows a transmission of 83% at 0–2 GHz, and meanwhile a shielding efficiency of more than 10 dB at 8–18 GHz, thereby basically justifying our design target. On this basis, a new type of double-layers' composite frequency selective surface (FSS) structure which is composed of facial layer, hollow hexagon ring array 1, middle spacer layer, hollow hexagon ring array 2 and another facial layer stacked layer by layer, is creatively designed, which displays excellent microwave low frequency band-pass and high frequency band-stop performances compared with a single layer hollow hexagonal periodic structure, and by simulation and optimization, structural parameters of the upper FSS structure are as follows: hexagon ring side length is 3.0 mm, line width 0.5 mm, gap width 0.4 mm, and the lower FSS structure parameters are as follows: hexagon ring side length is 3.2 mm, line width 0.5 mm, gap width 1.0 mm; simulation results show itself that dual different layers' FSS design presents itself excellent low frequency band-pass and high frequency band-stop transformation characteristics, and the fast switch capacity is the basic foundation for both excellent low frequency band-pass and outstanding high frequency band-stop characteristics. The effects of wave incidence angle (TE) on electrical performance of dual-layers FSS are investigated and the results indicate that the designed dual-layers' FSS possesses a wide angle insensitivity in a range of 0–45°, which is especially beneficial to engineering applications. Finally the composite structures with dual-layers' FSSs are manufactured and verified, and high transmission up to 95.6% at 0–2 GHz frequency band and more than 10 dB shielding efficiency at 7.05–18 GHz are obtained, which strongly testifies our design idea and has important significance for developing the high performance band-pass and band-stop composite structure and new electromagnetic functional composite materials.

Keywords: low frequency pass-band, high frequency stop-band, frequency selective surfaces, stealth

PACS: 84.30.Vn, 84.40.–X, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.64.188401

* Project supported by the major program of the Beijing Municipal Science and Technology Commission (Grant No. D14110300240000).

† Corresponding author. E-mail: hdqbiam@163.com