

基于人工表面等离子激元的双通带频率选择结构设计

王超 李勇峰 沈杨 丰茂昌 王甲富 马华 张介秋 屈绍波

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton

Wang Chao Li Yong-Feng Shen Yang Feng Mao-Chang Wang Jia-Fu Ma Hua Zhang Jie-Qiu
Qu Shao-Bo

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 204101 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180696

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180696>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[高温等离子体中太赫兹波的传输特性](#)

Transmission characteristics of terahertz wave in high temperature plasma

物理学报.2018, 67(17): 174101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180647>

[高对比度目标的电磁逆散射超分辨率成像](#)

Super-resolution imaging of high-contrast target in electromagnetic inverse scattering

物理学报.2018, 67(14): 144101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180266>

[基于宽带立体超透镜的远场超分辨率成像](#)

Far-field super-resolution imaging based on wideband stereo-metalens

物理学报.2018, 67(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172608>

[基于金属狭缝阵列的各向异性偏振分束器](#)

Anisotropic polarization beam splitter based on metal slit array

物理学报.2018, 67(9): 094102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172292>

[亚波长间距理想导体球阵列近区时间反演电磁场的快速求解](#)

Fast solution of near-field time reversal electromagnetic field of sub-wavelength perfect conducting ball arrays

物理学报.2018, 67(8): 084101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172508>

基于人工表面等离子激元的双通带 频率选择结构设计*

王超 李勇峰[†] 沈杨 丰茂昌 王甲富 马华 张介秋 屈绍波

(空军工程大学基础部, 西安 710051)

(2018年4月15日收到; 2018年5月22日收到修改稿)

本文提出了一种基于人工表面等离子激元的频率选择结构的设计方法: 将设计的频率选择表面和金属鱼骨结构阵列相结合得到一种新的频率选择结构. 文中采用这种方法设计了一种具有陡截止和高透、高抑制性能的双通带频率选择结构. 该结构由金属鱼骨结构阵列和上下两层相同的频率选择表面复合而成. 通过仿真可得, 该结构的两个通带频率范围分别是3.0—4.1和10.5—10.9 GHz, 透射率均在-0.5 dB以上. 透射率低于-10 dB的频率范围是4.7—9.2和12.1—18 GHz. 在12.4—15.5 GHz频率范围内, 该结构的透射率甚至低于-20 dB. 在通带内, 电磁波可以高效地透过该结构; 在阻带内, 该结构对电磁波的透射具有较好的抑制作用. 测试结果表明用这种方法设计出的频率选择结构的实际性能和仿真基本一致. 在金属鱼骨结构空隙中填入轻质泡沫后该结构具有一定的力学承载性能, 可以实现结构功能一体化的设计.

关键词: 人工表面等离子激元, 频率选择结构, 双通带, 集总电阻

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf, 77.22.-d, 84.90.+a

DOI: 10.7498/aps.67.20180696

1 引言

频率选择表面(frequency selective surface, FSS)是一种由金属贴片或孔径单元组成的二维周期阵列, 对不同频率的电磁波表现出带通或带阻的频谱滤波特性, 即在特定频带内的电磁波可以全部通过, 而在另一些频带内的电磁波被全部反射, 已被广泛应用于雷达(天线)罩^[1]、电磁兼容及电磁屏蔽、抛物面天线的副反射面和卫星通信等领域. 随着FSS的发展, FSS单元的结构组成已不仅限于传统的孔径型和贴片型两种结构, 还有双层或多层耦合结构^[2-5]、分形结构^[6]、基片集成波导结构^[7-11]、小型单元结构等^[12]. 人工表面等离子激元(spoof surface plasmon polariton, SSPP)^[13-19]是微波频段的表面等离子激元, 能量沿着材料或结构表面传播并被完全局限在材料或结构表面附近. 由于电磁波在SSPP中的传播常数远大于在自由空间中

的传播常数, 因此SSPP可以将自由空间中的电磁波耦合到结构表面传播, 提高透射效率.

本文所设计的频率选择结构是将FSS与金属鱼骨结构阵列相结合, 从而实现通阻带与截止频率的可调节, 提高工作频带内电磁波的透射率. 设计该频率选择结构时, 第一步是设计金属鱼骨结构阵列, 需要调节金属鱼骨结构中横向最长金属线的长度来确定截止频率的位置. 然后优化周期、高度和金属线间距等参数来提高SSPP的耦合效率, 从而提升通带内的透射率. 第二步是设计FSS, 它的作用是在金属鱼骨结构阵列的低频宽通带内引入传输零点, 从而产生新的通带特性. 为了使新的频率选择结构具有双通带特性, 设计的FSS也应当有双通带特性. 同时, 为了抑制电磁波在非工作频段内的透射, 在FSS上加载了集总电阻, 吸收部分电磁波. 最后将金属鱼骨结构阵列与FSS组合优化, 得到双通带频率选择结构.

* 国家自然科学基金(批准号: 61331005, 61471388, 61501503)和陕西省自然科学基金(批准号: 2017JM6005)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liyf217130@126.com

传统的FSS实现陡截止特性通常通过增加介质厚度来实现, 这样结构的面密度和插入损耗都会增大. 但利用金属鱼骨结构实现的频率选择结构透射率高、面密度小. 在通带内, 频率选择结构的透射率均在 -0.5 dB 以上. 使用时可将轻质泡沫填充到金属鱼骨结构中来提高频率选择结构的力学承载性能, 实现结构功能一体化的设计.

2 具有陡截止和高透高抑制性能的双通带频率选择结构

本文设计的双通带频率选择结构^[20]是由上下两层相同的FSS和一层金属鱼骨结构阵列组成的夹芯结构. 为了设计具有高效透射性能的金属线阵列结构, 首先对等长金属线阵列结构上SSPP的

色散进行了研究, 模型结构和仿真结果如图1(a)所示. 图中等长金属线阵列左右两侧的介质都是厚度为0.3 mm的F4B (介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 损耗角正切值 $\tan\delta = 0.001$). 从频率与传播常数(k)的关系可得, 金属线阵列结构中电磁波的色散曲线在自由空间波之下, 且在相同频率下金属线阵列结构中的电磁波有更大的传播常数, 这说明金属线阵列能够将电磁波耦合到结构表面. 因此, 沿着结构表面传播的 x -极化波可以被认为是在微波频段的SSPP, 并且能够被局域和增强. 从仿真结果可以看出, 随着金属锯齿高度 v 的增大, 截止频率不断向低频偏移, 所以可以通过调节金属鱼骨结构横向最长金属线的长度来设计截止频率. 为了实现电磁波在自由空间和SSPP之间高效地转换, 金属线阵列结构两端上SSPP的传播常数

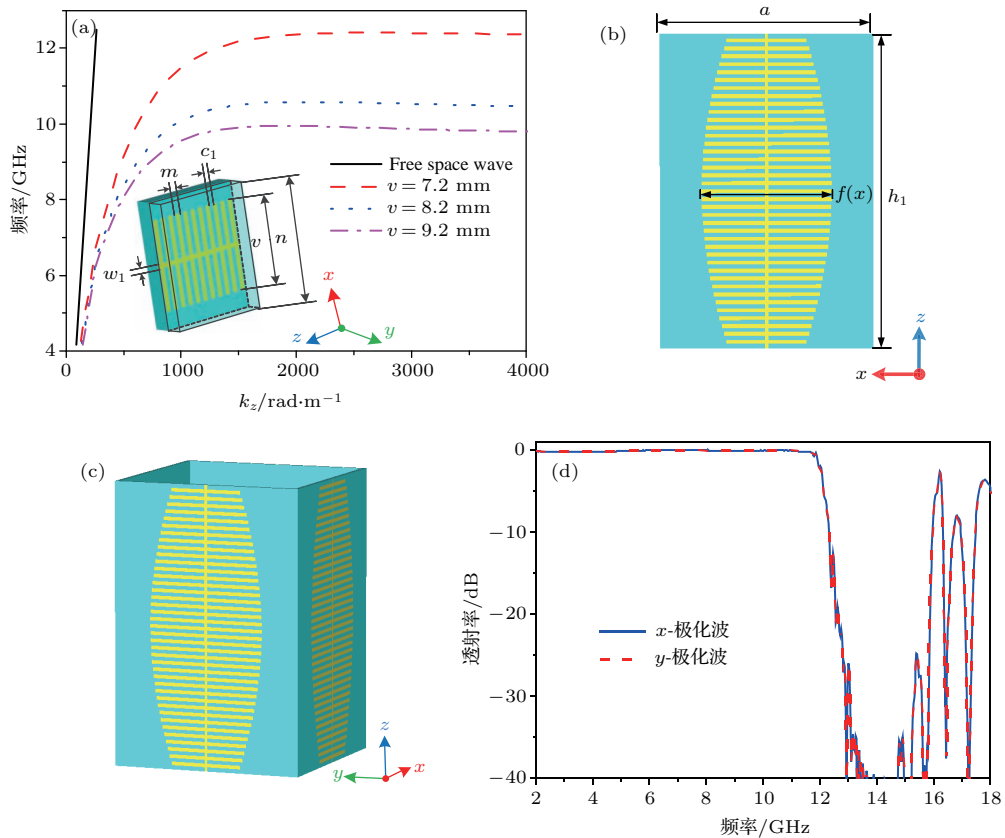


图1 (a) 等长金属线阵列结构上SSPP的色散曲线, 插图为等长金属线阵列结构示意图 ($c_1 = 0.25$ mm, $m = 0.25$, $n = 13.4$ mm, $w_1 = 0.2$ mm); (b) 金属线阵列结构示意图; (c) 金属鱼骨结构视图; (d) x -极化波和 y -极化波垂直入射下的金属鱼骨结构阵列透射率仿真结果

Fig. 1. (a) The simulated dispersion curves of SSPP on the metallic blade array structure with uniform-length blades, inset is the schematic diagram of the metallic blade array structure with uniform-length blades (with $c_1 = 0.25$ mm, $m = 0.25$, $n = 13.4$ mm, $w_1 = 0.2$ mm); (b) schematic diagram of the metallic blade array structure; (c) schematic diagram of the metallic fishbone structure; (d) simulated transmissivities of the metallic fishbone structure under x - and y -polarized waves normal incidence.

应该尽可能接近自由空间的传播常数, 而结构中中间位置附近的SSPP的传播常数要远大于自由空间的传播常数. 因此, 设计的金属线阵列结构是两端短中间长的金属鱼骨结构, 如图1(b)所示. 图中的金属线阵列由39根沿 x 方向阵列排布的金属线和一根沿 z 方向的金属线组成. 它能够高效耦合介质表面的电磁波, 并以较小的损耗将电磁波从另一端传输出去. 金属鱼骨结构的周期为 a , 高度为 h_1 , 金属线的长度为 $f(x)$, 沿 x 方向的金属线宽度为0.25 mm, 金属线之间的距离为0.25 mm, 沿 z 方向的金属线宽度为0.2 mm, 介质基板是厚度为0.3 mm的F4B. 优化后的参数值是 $a = 13.4$ mm, $h_1 = 19.85$ mm.

本文使用CST Microwave Studio 2015电磁仿真软件对金属鱼骨结构进行仿真计算, 在 x -极化波和 y -极化波垂直入射时, 金属鱼骨结构透射率如图1(d)所示. 在2—11.7 GHz频率范围内, 该结构的透射率都高于-0.5 dB. 金属鱼骨结构的截止频率为12 GHz, 在12.3—16 GHz频率范围内, 它的透射率都低于-10 dB. 在12.4—15.5 GHz频率范围内, 该结构的透射率甚至低于-20 dB. 说明在截止频率之后, 该结构能有效抑制电磁波的透射.

为了进一步说明电磁波在金属鱼骨结构中的传播特点, 图2给出了 x -极化波垂直入射下电场沿 x 分量的分布图. 在截止频率之前, $f = 8$ GHz时, 电磁波可以从自由空间耦合到金属鱼骨结构表面并传输, 再从另一端界面重新耦合到自由空间, 实现高效透射. 而在截止频率之后, $f = 15$ GHz时, 电磁波不能从另一端界面传输到自由空间, 大部分被金属鱼骨结构反射.

针对双通带的FSS设计, 由于金属网栅具有

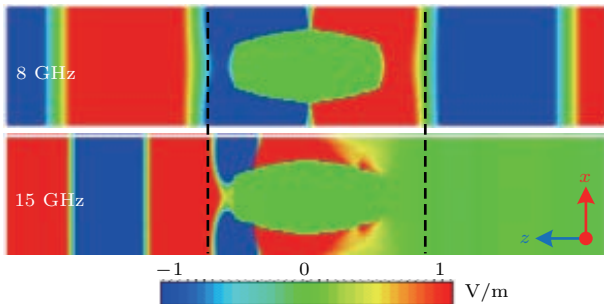


图2 在频率 $f = 8, 15$ GHz处, x -极化波垂直入射到鱼骨结构时电场沿 x 分量的分布图

Fig. 2. The simulated electric field x -component distributions of the metallic fishbone structure for x -polarized wave normal incidence at the frequency $f = 8$ and 15 GHz.

低反高通的特性, 方形孔径单元具有带通特性, 因此金属网栅加上两个方形孔径单元能够组成一个双通带FSS. 同时, 在FSS的反面加载十字金属线和集总电阻来吸收部分非工作频带内的电磁波, 提升FSS在非工作频带对电磁波透射的抑制效果. 如图3(a)所示, FSS单元周期 $a_3 = 13.4$ mm, 外侧金属线宽 $w_3 = 0.1$ mm, 中间方形金属线长 $a_4 = 12.2$ mm, 线宽 $w_4 = 0.8$ mm, 内侧方形金属线长 $a_5 = 5.2$ mm, 线宽 $w_5 = 0.3$ mm, 介质基板厚度为0.3 mm. 采用方形孔径结构是为了引入传输零点, 在鱼骨结构的截止频率之前形成两个通带. 在图3(b)中, 十字单元线长 $a_6 = 10.5$ mm, 线宽 $w_6 = 0.5$ mm. 十字单元中间断开部分的间距 $c_1 = 0.7$ mm, 集总电阻阻值为100 Ω . 加载集总电阻能有效吸收大部分十字单元谐振频率附近的电磁波, 起到了抑制电磁波透射的作用.

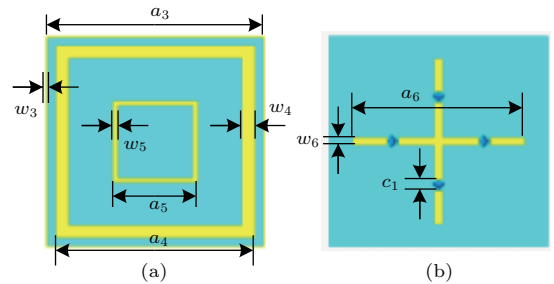


图3 (a) FSS的正视图; (b) FSS的后视图
Fig. 3. (a) Front view of FSS; (b) back view of FSS.

为了对比加载十字单元和集总电阻与不加载的区别, 图4(a)和图4(b)给出了两组不同FSS的示意图, FSS间的距离 $h_1 = 19.85$ mm, 中间介质为空气. 当间距 h_1 等于半波长或者四分之一波长时, 电磁波在不同介质传播时在其交界面处引起的反射会减小, 从而提高了电磁波在该频点的透射效果. 图4(c)中频率 $f = 6.7$ GHz与 $f = 15.3$ GHz处产生的透射峰就是由上述原因引起的. 对比图4(c)和图4(d)可得, 加载了十字单元与集总电阻后, 频率 $f = 6.7$ GHz和15.3 GHz附近的透射率明显降低, 能够较好地抑制带外电磁波的透射.

设计完FSS后, 将它组合到金属鱼骨结构阵列上, 形成双通带频率选择结构. 如图5所示, 结构单元周期 $a = 13.4$ mm, 高度 $h = 20.45$ mm, FSS的厚度 $d = 0.3$ mm, 上下两层FSS完全相同, FSS一面刻蚀金属单元, 另一面刻蚀金属单元并加载集总电阻. 在不同极化角度($\phi = 0^\circ, 45^\circ$ 和 90°)的线极

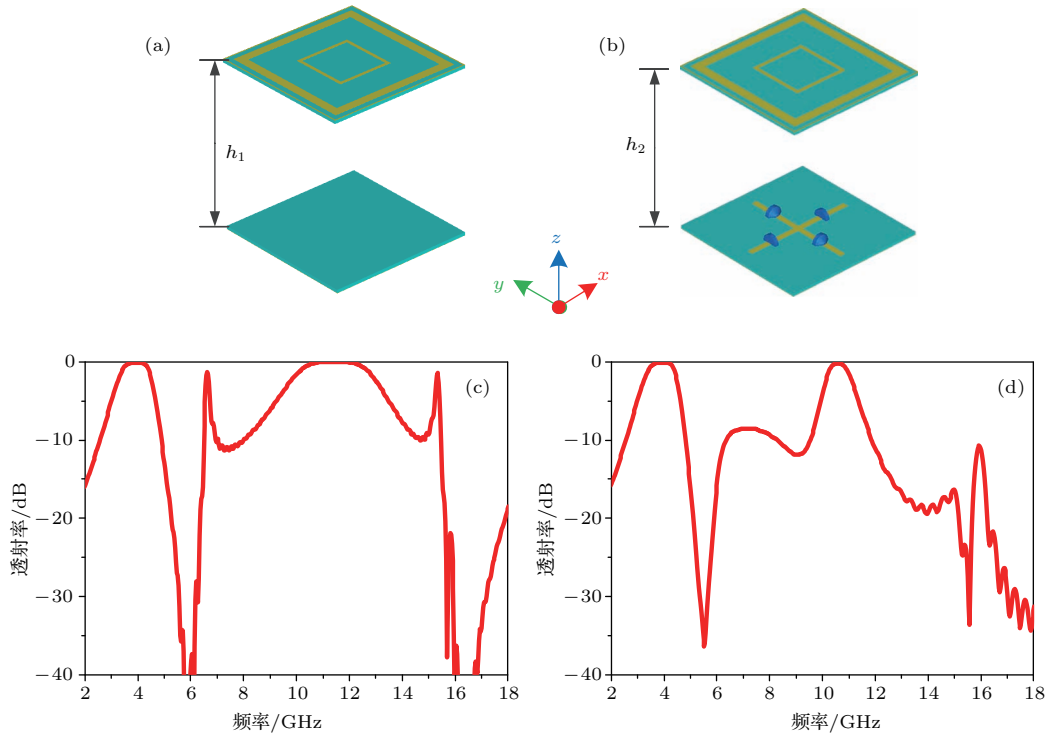


图4 (a) FSS模型示意图; (b) 加载十字结构和集总电阻后的FSS模型示意图; (c) FSS的透射率; (d) 加载十字单元和集总电阻后FSS的透射率

Fig. 4. (a) Schematic diagram of the FSS; (b) schematic diagram of the FSS loaded cross wires and lumped resistors; (c) simulated transmissivity of the FSS; (d) simulated transmissivity of the FSS loaded cross wires and lumped resistors.

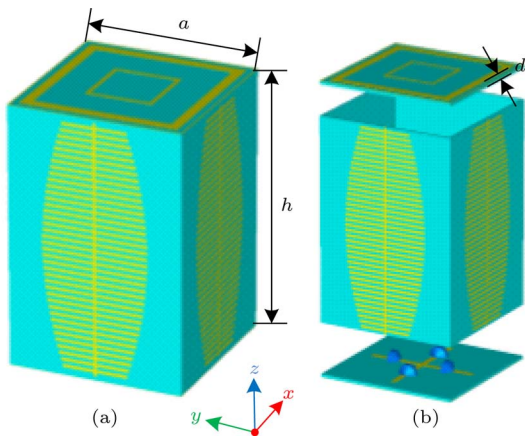


图5 (a) 双通带频率选择结构图; (b) 双通带频率选择结构分解图

Fig. 5. (a) Schematic view of the dual-band-pass frequency selective structure; (b) exploded view of the dual-band-pass frequency selective structure.

化波垂直入射时, 双通带频率选择结构的透射率仿真结果如图6(a)所示. 当极化角度 $\phi = 0^\circ$ 和 90° 时, 在第一个通带处, 透射率高于 -0.5 dB 的频率范围是 $3.0\text{--}4.1$ GHz, 带宽为 1.1 GHz. 在第二个通带处, 透射率高于 -0.5 dB 的频率范围是 $10.5\text{--}10.9$ GHz, 带宽为 400 MHz. 当极化角度

$\phi = 45^\circ$ 时, 透射率和通带带宽有所下降. 同时我们对双通带频率选择结构在 x -极化波以不同入射角度 ($\theta = 20^\circ, 40^\circ$ 和 60°) 入射时的透射率进行了仿真, 仿真结果如图6(b)所示. 可以看出: 在第二个通带处, 结构对入射角度比较敏感. 在带内, 该结构能够保证入射电磁波的高效透射; 在带外, 该结构利用反射加吸收的机理来降低入射电磁波的透射率. 透射率低于 -10 dB 的频率范围是 $4.7\text{--}9.2$ GHz 和 $12.1\text{--}18$ GHz. 并且在 $12.4\text{--}15.5$ GHz 频率范围内, 透射率甚至低于 -20 dB, 能有效抑制电磁波的透射. 该结构的吸收效果如图6(c)所示, 在 $7.7\text{--}9.4$ GHz 频段内, 吸收率达到了 70% 以上, 有效抑制了非工作频段内的透射. 另外还对金属网栅与大方形孔径单元和金属网栅与小方形孔径单元组成的FSS进行了仿真, 仿真结构和结果如图6(d)所示. 从仿真结果可以看出, 大方形孔径单元对应的通带中心频点在 4 GHz 附近, 小方形孔径单元对应的通带中心频点在 10.5 GHz 附近. 由于设计时还加入了集总元件进行吸波, 因此图6(a)中双通带频率选择结构的第二个通带带宽

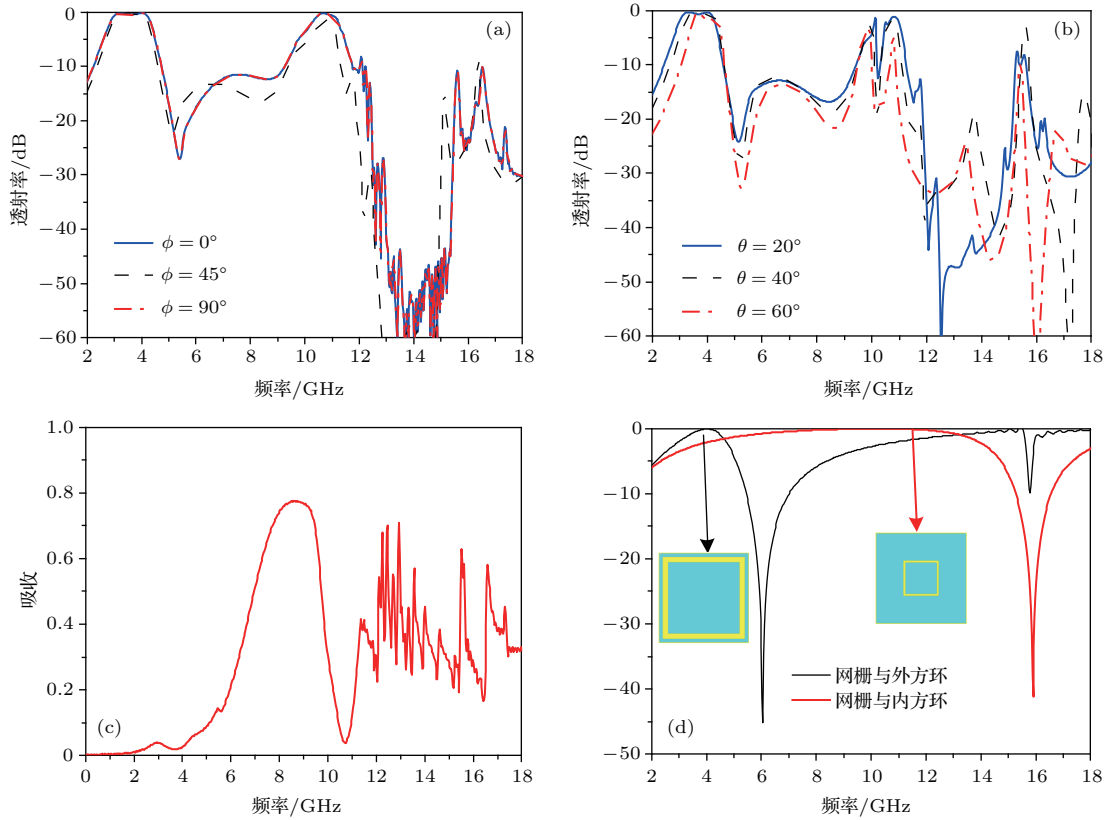


图6 (a) 不同极化角度 ($\phi = 0^\circ, 45^\circ$ 和 90°) 的线极化波垂直入射时, 双通带频率选择结构的透射率仿真结果; (b) 不同入射角度 ($\theta = 20^\circ, 40^\circ$ 和 60°) 下的双通带频率选择结构的透射率仿真结果; (c) x -极化波垂直入射下的双通带频率选择结构的吸收率; (d) 金属网栅分别与大、小方形孔径单元组成的 FSS 的透射率仿真结果

Fig. 6. (a) Simulated transmissivities of the dual-band-pass frequency selective structure under different polarization angles ($\phi = 0^\circ, 45^\circ$ and 90°) of linear polarized waves normal incidence; (b) simulated transmissivities of the dual-band-pass frequency selective structure under different incident angles ($\theta = 20^\circ, 40^\circ$ and 60°); (c) absorptivity of the dual-band-pass frequency selective structure under x -polarized wave normal incidence; (d) simulated transmissivities of the FSS with metal grid and different squarer aperture units.

要比图 6 (d) 中金属网栅与小方形孔径单元组成的 FSS 的通带带宽窄. 但总体而言, 通带的位置基本符合, 大方形孔径单元与双通带频率选择结构的第一个通带对应, 小方形孔径单元则与双通带频率选择结构的第二个通带对应.

3 实验验证

采用印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 工艺, 加工的 FSS 样品尺寸为 $268 \text{ mm} \times 268 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$. FSS 样品的结构如图 7 所示, 正面是网栅和方形孔径单元, 反面是十字金属线和加载的集总电阻.

加工的金属鱼骨结构阵列的尺寸为 $268 \text{ mm} \times 268 \text{ mm} \times 19.85 \text{ mm}$, 样品如图 8 (a) 所示. 本文利用自由空间法在暗室环境下对样品进行测试, 测试时, 样品垂直置于转台上, 两个标准增益喇叭天线

分别固定于转台的两个悬臂上, 一个作为发射天线, 另一个作为接收天线. 测试的金属鱼骨结构阵列透射率如图 8 (b) 所示. 在 12 GHz 之前, 该结构的透射率基本都高于 -0.5 dB , 具有较好的透射性能. 在截止频率之后, 13—18 GHz, 该结构的透射率均低于 -10 dB , 在 13.6—16 GHz, 透射率均低于 -20 dB , 说明该结构在截止频率后对电磁波的透射具有较好的抑制作用.

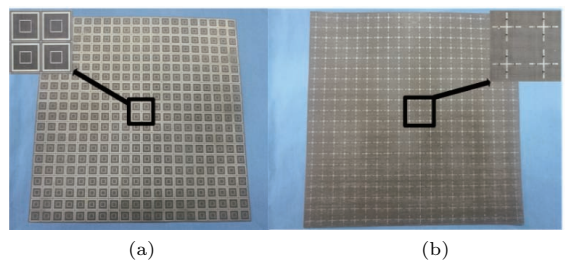


图7 (a) FSS 正视图; (b) FSS 后视图

Fig. 7. (a) The front elevation of FSS; (b) the back elevation of FSS.

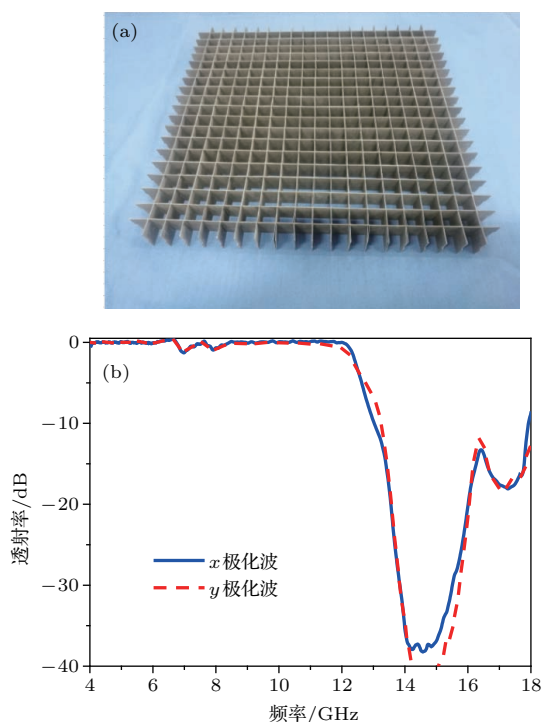


图8 (a) 金属鱼骨结构阵列样品图; (b) 在 x -极化波和 y -极化波垂直入射下的金属鱼骨结构阵列样件的透射率
Fig. 8. (a) Picture of the metallic fishbone structure array; (b) measured transmissivities of metallic fishbone structure array under x - and y -polarized waves normal incidence.

如图9(a)所示, 将上述的FSS和金属鱼骨结构阵列组合得到双通带频率选择结构, 样件的尺寸为268 mm × 268 mm × 20.45 mm. 测试该结构得到的透射率如图9(b)所示, 第一个通带的频率范围是3.5—4.1 GHz, 带宽600 MHz, 透射率均高于-0.5 dB. 第二个通带的频率范围是11.1—11.5 GHz, 带宽400 MHz, 透射率均在-1 dB左右. 测试结果与仿真结果稍有偏差, 但总体趋势是一致的, 验证了设计的可行性.

4 结 论

本文基于SSPP设计了一种具有陡截止和高透高抑制性能的双通带频率选择结构, 在通带内, 该结构的透射率高于-0.5 dB. 与传统的FSS相比, 金属鱼骨结构阵列的引入能够有效改善双通带频率选择结构在通带内的透射性能以及带外电磁波的透射. 设计的双通带频率选择结构能够实现在3.0—4.1 GHz和10.5—10.9 GHz两个频带内高效透射, 而在4.7—9.2 GHz和12.1—18 GHz频率范围内该结构能有效抑制透射效果. 在金属鱼骨结构

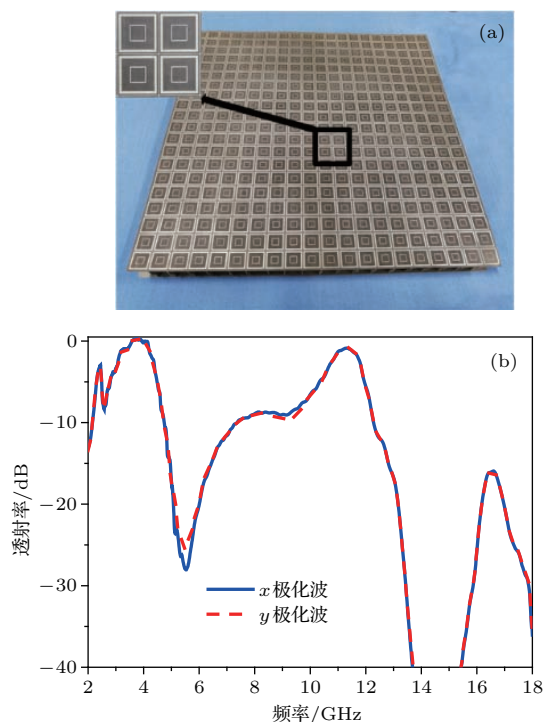


图9 (a) 双通带频率选择结构图; (b) 双通带频率选择结构透射率的测试数据
Fig. 9. (a) Photograph of the dual-band-pass frequency selective structure; (b) measured transmissivities of the dual-band-pass frequency selective structure under x - and y -polarized waves normal incidence.

中填入轻质泡沫后它的承载性能会有显著提升, 可以用在舰船电磁窗、舰船桅杆等, 实现结构功能一体化设计.

参考文献

- [1] Lu G W, Zhang J, Yang J Y, Zhang T X, Kou Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 198401 (in Chinese) [鲁戈舞, 张剑, 杨洁颖, 张天翔, 寇元 2013 物理学报 **62** 198401]
- [2] Sarabandi K, Behdad N 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 1239
- [3] Salehi M, Behdad N 2008 *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* **18** 785
- [4] Behdad N, Aljournayly M A, Salehi M 2009 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **57** 460
- [5] Aljournayly M A, Behdad N 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 4042
- [6] Wang S S, Gao J S, Liang F C, Wang Y S, Chen X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050703 (in Chinese) [王珊珊, 高劲松, 梁凤超, 王岩松, 陈新 2011 物理学报 **60** 050703]
- [7] Luo G Q, Hong W, Hao Z C, Liu B, Li W D, Chen J X, Zhou H X, Wu K 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 4035
- [8] Luo G Q, Hong W, Lai Q H, Wu K, Sun L L 2007 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **55** 2481

- [9] Luo G Q, Hong W, Tang H J, Chen J X, Yin X X, Kuai Z Q, Wu K 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 92
- [10] Luo G Q, Hong W, Lai Q H, Sun L L 2008 *IET Microwaves Antennas Propag.* **2** 23
- [11] Zuo Y, Shen Z X, Feng Y J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034101
- [12] Huang F X, Batchelor J C, Parker E A 2006 *Electron. Lett.* **42** 788
- [13] Pendry J B, Martinmoreno L, Garcıavidal F J 2004 *Science* **305** 847
- [14] Ma H F, Shen X P, Cheng Q, Jiang W X, Cui T J 2014 *Laser Photonics Rev.* **8** 146
- [15] Shen X P, Cui T J, Martincano D, Garcıavidal F J 2013 *PANS* **110** 40
- [16] Gao X, Shi J H, Ma H F, Jiang W X, Cui T J 2012 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45** 505104
- [17] Shen X P, Cui T J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 211909
- [18] Li Y F, Ma H, Wang J F, Pang Y Q, Zheng Q Q, Chen H Y, Han Y J, Zhang J Q, Qu S B 2017 *Sci. Rep.* **7** 40727
- [19] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Feng M D, Wang J, Xu Z 2016 *Opt. Express* **24** 842
- [20] Fu W Y, Han Y C, Li J D, Wang H S, Li H P, Han K, Shen X P, Cui T J 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 285110

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton*

Wang Chao Li Yong-Feng[†] Shen Yang Feng Mao-Chang Wang Jia-Fu Ma Hua
Zhang Jie-Qiu Qu Shao-Bo

(Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 15 April 2018; revised manuscript received 22 May 2018)

Abstract

In this paper, a method of designing the frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton (SSPP) is proposed and demonstrated. According to the applications in different working bands, the designed frequency selective surface (FSS) and metallic fishbone structure array can be combined together to form a new frequency selective structure and satisfy the requirements for practical applications. Meanwhile, a dual-band-pass frequency selective structure with the property of steep cut-off frequency and high-efficiency transmission and inhibition is designed by using this method. The dual-band-pass frequency selective structure is composed of a metallic fishbone structure array and two identical FSSs. The metallic fishbone structure based on SSPP coupling can form a broadband high-efficiency transmission below the cut-off frequency of SSPP on the metallic fishbone structure. When a dual-band-pass FSS is loaded to this metallic fishbone structure array, a dual-band-pass frequency selective structure can be achieved. To improve the impedance matching of the dual-band-pass frequency selective structure, two identical FSSs are respectively loaded to the top and bottom sides of the metallic fishbone structure array. The simulated transmissivities of the dual-band-pass frequency selective structure exceed -0.5 dB in two frequency ranges: 3.0–4.1 GHz and 10.5–10.9 GHz. The simulated transmissivities are lower than -10 dB in other frequency ranges: 4.7–9.2 GHz and 12.1–18 GHz. The simulated transmissivities are even below -20 dB from 12.4 GHz to 15.5 GHz. The electromagnetic waves can be efficiently transmitted in the passband and restrained in the stopband. Then the dual-band-pass frequency selective structure is fabricated by using the printed circuit board technique and measured in the anechoic chamber. The measured results indicate that the real property of the dual-band-pass frequency selective structure is consistent with the simulated property and this method of designing the frequency selective structure is feasible. After filling the lightweight foam into the gap of the metallic fishbone structure, the mechanical loading property can be highly improved. Therefore, we can realize the design of combined structural and functional performance.

Keywords: spoof surface plasmon polariton, frequency selective structure, dual-band-pass, lumped resistance

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf, 77.22.-d, 84.90.+a

DOI: 10.7498/aps.67.20180696

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61331005, 61471388, 61501503) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2017JM6005).

[†] Corresponding author. E-mail: liyf217130@126.com