

文章编号: 1672-8785(2021)07-0017-09

基于频率选择表面的太赫兹 双通带滤波器研究

李天诚¹ 陈鹤鸣^{2*}

(1. 南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 目前双频带频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)结构存在的通带选频性能有限。为了提高太赫兹频段通带滤波器件的性能, 设计了一种基于频率选择表面的太赫兹双通带滤波器。该器件主要由三层正四边形的同心金属铜环组成, 中间加载了介质衬底。金属层与衬底的厚度均为 0.04λ , 其中 λ 为低频波段的波长, 单元尺寸为 0.15λ 。根据等效电路法分析了该结构产生双频通带的原因, 并对设计的结构优化作了进一步的讨论。通过改变等效电路元件的参数等价地调整了原始结构的几何参数。仿真结果与理论计算基本吻合, 优化后的器件可在 2.74 THz 和 8.17 THz 两个中心频率处实现通带滤波。低频处的一 1 dB 通带范围为 2.24~3.25 THz, 插入损耗为 -0.05 dB; 高频处的一 1 dB 通带范围为 7.63~8.71 THz, 插入损耗为 -0.12 dB。滤波特性曲线的陡峭度好且相对带宽均超过 10%。该结构尺寸小, 频率选择性好, 角度稳定性高, 可用于太赫兹频段的宽频带滤波, 对未来的太赫兹通信具有重要的应用价值。

关键词: 太赫兹; 频率选择表面; 带通滤波器; 等效电路法

中图分类号: TN713 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.07.003

Research on Terahertz Dual-passband Filter Based on Frequency Selective Surface

LI Tian-cheng¹, CHEN He-ming^{2*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of

Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: The current dual-band frequency selective surface (FSS) structure has limited passband frequency selection performance. In order to improve the performance of the terahertz band passband filter device, a terahertz dual-passband filter based on FSS is designed. The device is mainly composed of three layers of concentric metal copper rings in a regular quadrilateral, with a dielectric substrate loaded in the middle. The thick-

收稿日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571237); 江苏省自然科学基金项目(BK20151509)

作者简介: 李天诚(1996-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事频率选择表面设计等研究。

*通讯作者: E-mail: chhm@njupt.edu.cn

ness of the metal layer and the substrate are both 0.04λ , where λ is the wavelength of the low frequency band, and the unit size is 0.15λ . According to the equivalent circuit method (ECM), the reason for the dual-frequency passband of the structure is analyzed, and the structural optimization of the design is further discussed. The geometric parameters of the original structure are equivalently adjusted by changing the parameters of the equivalent circuit components. The simulation results are basically consistent with the theoretical calculations. The optimized device can achieve passband filtering at two center frequencies of 2.74 THz and 8.17 THz. The band range at lower frequencies with insertion loss less than -1 dB is 2.24~3.25 THz, where the maximum insertion loss is only -0.05 dB. At higher frequencies, the band range is 7.63~8.71 THz, where the maximum insertion loss is just -0.12 dB. The steepness of the filter characteristic curve is good, and the relative bandwidth exceeds 10%. The structure has small size, good frequency selectivity, and high angular stability. It can be used for broadband filtering in the terahertz frequency band, and has important application value for future terahertz communications.

Key words: terahertz; frequency selective surface; bandpass filter; equivalent circuit method

0 引言

太赫兹波是一种频率范围为 0.1~10 THz 的电磁波^[1], 介于微波与红光之间, 并具有非常广泛的应用^[2]。它在频带资源等方面的独特性, 使其成为适合未来 6G 通信的关键支撑技术^[3]。其中, 太赫兹通信技术的迅猛发展对器件提出了更加苛刻的要求, 例如更大的信道容量、更好的性能、更可靠的通信连接等。与传统的单向传输太赫兹通信系统相比, 全双工通信可带来更小的器件尺寸和更高的系统增益, 使通信器件的小型化、多频化、密集化成为发展趋势。因此, 双频通信器件研究具有重要的现实意义。

在实际应用中, 由于噪声不可避免地存在, 传输的信号会受到影响, 从而降低通信质量。为提高系统性能, 需要使用滤波器对信号进行频域处理。这对太赫兹频段的通信系统来说也不例外, 因此需要一种宽带宽、高效传输以及良好阻带(或通带)上升沿、下降沿陡降度的太赫兹滤波器。

FSS 是一种将单元结构周期性排列起来的二维或三维阵列结构, 对空间电磁波具有选择性^[4], 并可控制其透射或反射。作为一种空间滤波器, FSS 可实现低通、高通、带通和带阻的滤波特性^[5]。随着 FSS 研究的不断深入, 基于 FSS 的功能器件层出不穷, 如反射器^[6]和吸收器^[7]。而且由于在工作频段具有较强的频率

选择性和较高的角度稳定性等, 它被广泛应用于天线反射面^[8]、雷达^[9]和卫星通信^[10]等各种通信系统。因此, 利用 FSS 设计太赫兹滤波器可以提高器件性能。

THz 波段的带通滤波器利用金属网格与入射电磁波发生电磁感应^[11], 通过改变电荷分布的方式改变相应频率。近年来, 各种基于 FSS 的 THz 滤波器层出不穷, 如基于分型单元的 FSS 结构^[12]、开口环型 FSS 结构^[13]、双层六边形型结构^[14]、基于 VO_2 的“门”字型结构^[15]和添加矩形波导的 FSS 结构^[16]等。以上这些结构均存在一些不足, 比如结构复杂、频率选择性差、插入损耗较高、相对带宽较窄等。

为了解决上述问题, 本文设计了一种可应用在 1~10 THz 波段的双通带滤波器, 即采用基于多层正方形环的 FSS 单元结构。该滤波器结构简单、通带范围大、频率选择性好、插入损耗低、角度稳定性强, 在太赫兹通信系统中具有很大的应用潜力。

1 理论分析与结构设计

图 1 所示为本文所提出的双频带滤波器的 FSS 单元结构。该结构的正方形边长为 p , 每层介质板的高度为 h 。每个单元结构包含三层金属环与两层衬底, 其中金属环采用的材料为铜。每两层金属环之间有一层衬底介质板。后者采用的是 Arlon AD260A 材料。该材料的介

电常数 ϵ_r 为 2.6, 损耗角正切值为 0.017。为了实现双频带通滤波, 可以采用多层级联的 FSS 结构。其中, 上下两层为两个金属面, 其图案设计为两个同心的正方形环。如图 1(a) 所示, 边长分别为 d_2 和 d_3 , 厚度分别为 s_2 和 s_3 。中间层金属环的图案为一个单正方形环, 如图 1(b) 所示。方形环的厚度为 s_1 , 边长 d_1 与单元结构的边长 p 相同, 因此相邻排列后形成方形栅格。由于正方形本身的形状就具有中心对称性, 保证了电磁波在垂直入射条件 ($-k$ 方向) 下的极化稳定性。整体单元结构如图 1(c) 所示。

对于本文设计的方形环型孔 FSS 单元来说, 当电磁波入射到单元结构时, 在电场的激励下, 金属铜片表面会激发出大量的自由电子, 从而产生电磁振荡。在这过程中入射的电磁波的大部分能量会被其吸收, 导致很少的电磁波能够透过这层 FSS。如果此时由电磁场引起的自由电子的振荡频率与入射波的频率相同, 并会随着入射电磁波频率的改变而变化, 那么当两者恰好能够支持自由电子在孔径两侧来回振荡时, 电子的规律运动会使孔径周围产

生较大的感应电流, 且向透射方向辐射能量 (表现为透射特性)。

由于 FSS 图案的复杂性, 不易直接进行定量分析, 而一般可采用等效电路法^[17] 进行分析。先分析一些形状上有规律可循的图案, 然后通过定量分析电路模型来定性分析^[18] 该 FSS 的性能。FSS 单元可以用作一种空间电磁波滤波器。按照通带特性将 FSS 滤波器分为低通、高通、带通和带阻等最基本的四大类。图 2 所示为四种不同滤波特性的 FSS 及其等效电路模型^[18]。

根据传输线理论^[19], 在入射波交变电场的作用下, 图 1(a) 和图 1(b) 中的金属环 FSS 边缘产生感应交变电电荷聚集。所以金属环间的空隙可等效成电容, 金属铜片在交变磁场作用下可等效成电感, 则图 1 所示的单元结构可等效为电容和电感的串联^[20]。在本文设计的单元结构中, 顶层与底层 FSS 图案完全一致, 因此只需两个 LC 谐振电路即可表示 FSS 单元结构。每个介质层的等效阻抗为 $Z_1 = Z_0 \sqrt{\epsilon_r}$, 其中 $Z_0 = 337 \Omega$ 为自由空间阻抗, ϵ_r 为介质板的

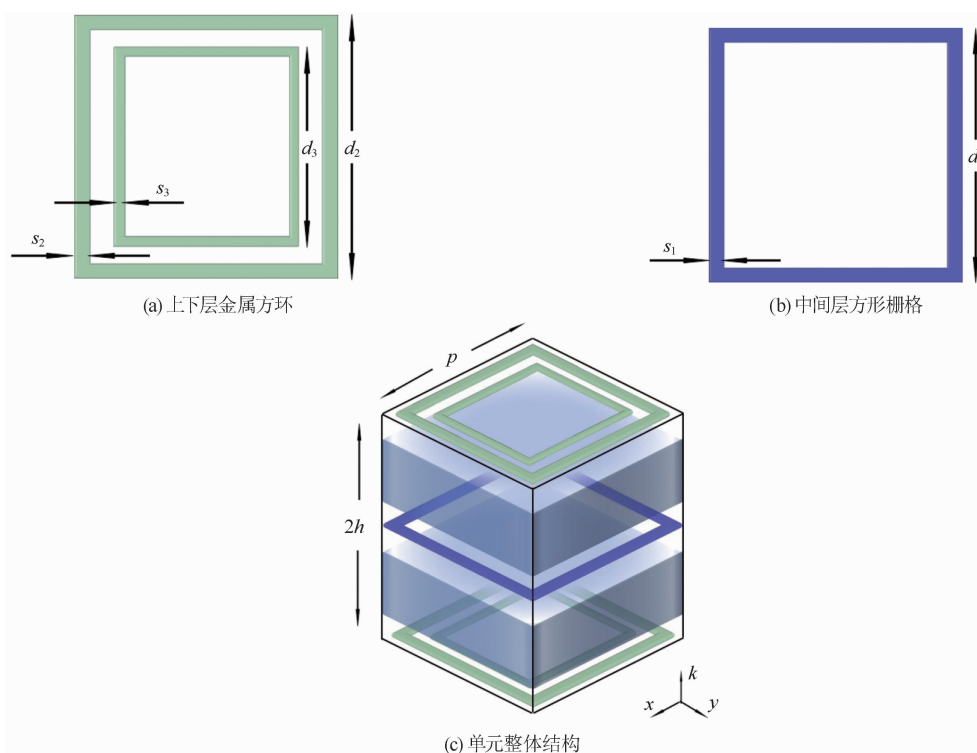


图 1 FSS 单元结构

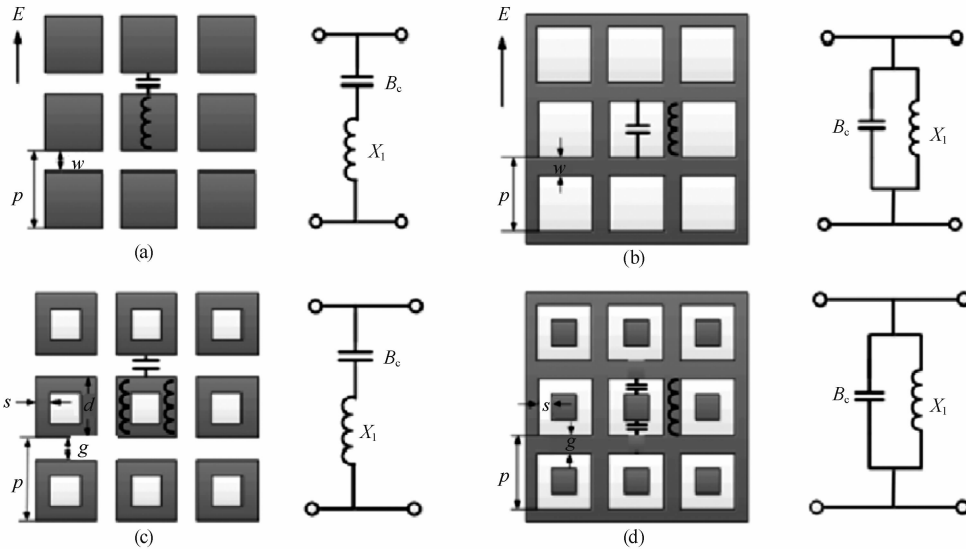


图 2 四种滤波特性不同的 FSS 及其等效电路模型:(a)低通;(b)高通;(c)带阻;(d)带通^[18]

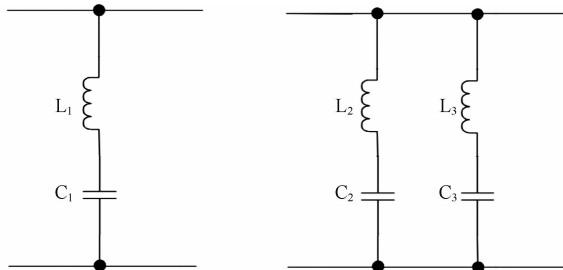


图 3 中间层与上下层 FSS 图案的等效电路模型

介电常数。图 3 所示为本文设计的单元结构的等效电路模型。其中，左侧端口均为输入端口，右侧端口均为输出端口。

根据传输线理论^[19]，每个等效电感 L_i 和电容 C_i 可近似表示为

$$C_j \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{2d_j}{\pi} \ln(\sin \frac{\pi s_j}{2d_j}) \quad (j=1,2,3) \quad (1)$$

$$L_i \approx \mu_0 \frac{d_i}{2\pi} \ln(\sin \frac{\pi \omega_i}{2d_i}) \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

$$\omega_i = \begin{cases} d_i - 2s_i, & i=1,3 \\ \frac{d_i - d_{i+1}}{2}, & i=2 \end{cases} \quad (3)$$

式中， μ_0 为真空磁导率， ϵ_0 为真空介电常数， d_i 为图 1 中金属环各边的长度， s_j 为各边的厚度， ω_i 为间隔缝隙宽度金属环的间隔宽度。对于图 1(a)中的上下层金属环内环与图 1(b)中的中间层栅格来说， ω_i 为两环之间方形孔径的边长；对于图 1(a)中的上下层金属环外环来说， ω_i 为内外环缝隙距离。表 1 列出了根据式

(1)~式(3)计算出的各元件的参数值。

表 1 FSS 等效电路各元件的参数值

参数名	近似值
L_1	6.05 fH
L_2	2.53 pH
L_3	0.57 pH
C_1	0.44 fF
C_2	0.35 fF
C_3	0.20 fF

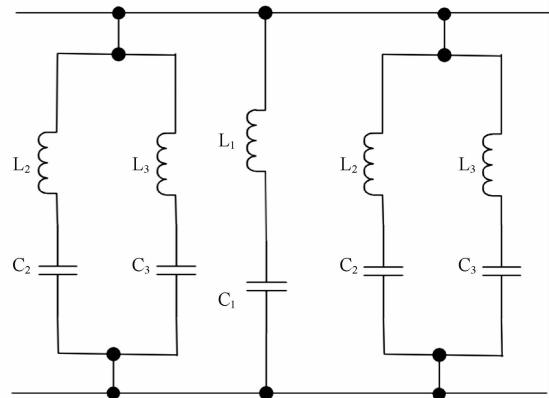


图 4 FSS 单元结构的等效电路模型

根据表 1 可得到单元结构整体的等效电路模型图(见图 4)。通过分析该等效电路可知，它包含两个谐振频点 f_1 与 f_2 ，相应的计算公式为^[21]

$$f_1 \approx \frac{1}{2\pi} [(C_1 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r h}{2})(2L_1 + \mu_0 \mu_r h)]^{-1/2} \quad (4)$$

$$f_2 \approx \frac{1}{2\pi} (\frac{L_2 + L_3}{1/C_2 + 1/C_3})^{-1/2} \quad (5)$$

式中, μ_r 为介质板的相对磁导率。将各元件的参数值代入式(4)和式(5), 可计算出该 FSS 单元结构的等效电路模型的谐振频点。其中, 低频谐振频点的近似值 f_1 为 2.91 THz, 高频谐振频点的近似值 f_2 为 9.74 THz。

在 FSS 的等效电路结构中, 图 4 中的输入输出响应可看成是包含输入-输出的二端口网络, 通常用 S 参数来衡量该网络的传输特性, 其物理意义如图 5 所示。

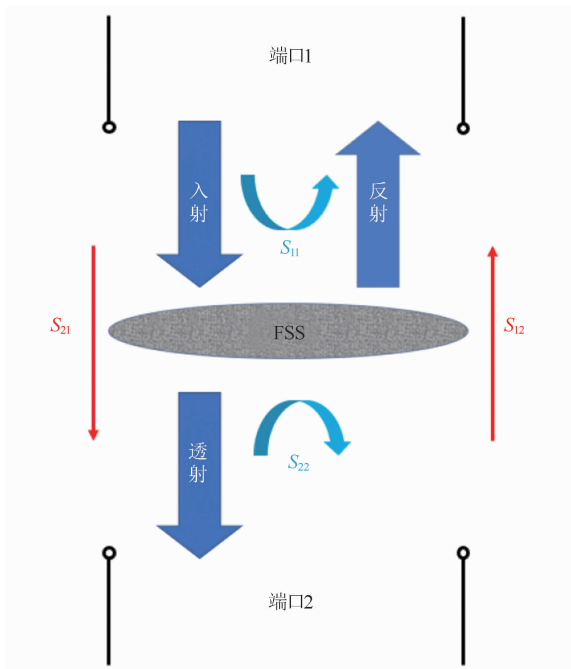


图 5 等效电路分析中 S 参数的物理意义

从图 5 中可以看出, 入射电磁波从端口 1 输入, 遇到 FSS 后有一部分被反射回来; 同时, 另一部分能量会透过 FSS 结构, 被端口 2 的探测器捕获。定义两个相关的散射参数(S 参数): 回波损耗 S_{11} 为反射能量与入射能量的比值, 插入损耗 S_{21} 为透射能量与入射能量的比值。根据能量守恒原理, 在理想情况下二者幅度的平方和为归一化总能量, 即 $(S_{11})_{\text{mag}}^2 + (S_{21})_{\text{mag}}^2 = 1$ 。因此, 滤波效果的优劣可由 S 参数来表征。在通带情况下, S_{21} 应尽可能大但无法超过理想值 1, 即 0 dB。非通带时 S_{21} 要尽可能小。本文将使 S_{21} 不小于 -1 dB 的频率 f 的范围定义为 -1 dB 带宽, 其频带中点的频率为中心频率 f_{center} ; 将相对带宽 f_{loc} 定义为 -1

dB 带宽与中心频率的比值, 即

$$BP_{-1\text{dB}} = \bigcup_{i=1}^{\infty} \{f_i | -1 \text{ dB} \leq S_{21}(f_i) \leq 0 \text{ dB}\} \quad (6)$$

$$f_{\text{loc}} = \frac{BP_{-1\text{dB}}}{f_{\text{center}}} \quad (7)$$

2 结构优化与性能分析

本文利用 HFSS 软件进行性能分析。在该软件中, 根据图 1 建立模型结构并设置 Master-Slave 条件, 然后通过定性分析等效电路图的元件参数变化对 LC 谐振电路的影响, 得到了效果最优的 S 参数曲线(见图 6)。此时的 FSS 模型尺寸见表 2。

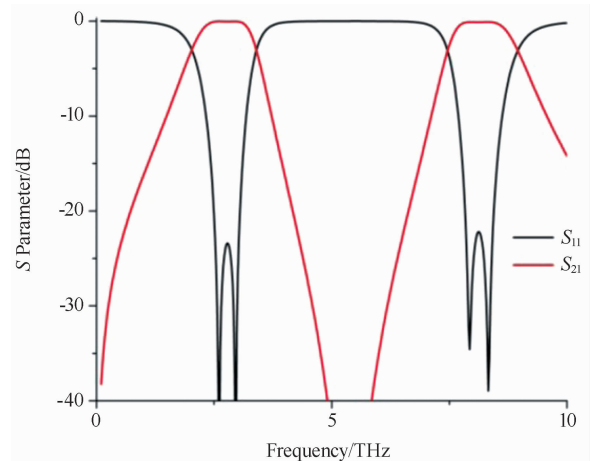


图 6 单元结构的 S 参数曲线

表 2 FSS 单元结构的几何参数

参数名	数值/ μm
p	9.4
h	4.76
d_1	9.4
d_2	9
d_3	6.16
s_1	0.24
s_2	0.4
s_3	0.4

在最优设计下的 FSS 单元结构可在中心频率为 2.74 THz 和 8.17 THz 的两个频段实现宽带滤波, 这与式(4)及式(5)计算出的近似频率基本吻合。低频处的 -1 dB 通带范围为 2.24~3.25 THz, 插入损耗为 -0.05 dB, 带宽为 1.01 THz, 相对带宽为 36.9%。高频处的 -1 dB 通带范围为 7.63~8.71 THz, 插入

损耗为 -0.12 dB, 带宽为 1.08 THz, 相对带宽为 13.2% 。通带范围比较平稳, 且上升与下降沿较为陡峭, 表明该 FSS 单元结构具有良好的频率选择性。

下面分析介质层厚度 h 对 S 参数的影响 (见图 7)。当 $h=h_0=\lambda/23=4.76\ \mu\text{m}$ 时, 可以得到低频与高频近乎对称的两段 S 参数曲线。当 $h<h_0$ 时, 低频谐振更剧烈; 当 $h>h_0$ 时, 高频谐振更加剧烈。

通过使用仿真软件的 J-Surf 功能, 可以查看表面电流分布情况。图 8 为低频下 FSS 的表面电流分布图。其中, 颜色越红, 说明电流密度越大。可以看出, 低频时, 表面电流主要分布于上下两层同心方环的外环和中间层的方形栅格, 说明第一谐振频率受两者的影响。由于中间层栅格的长度固定, 因此可以优化其宽度 d_1 , 改变与上下层金属图案的重叠区域的面积, 从而得到不同的 S 参数。栅格的不同宽度对 S 参数影响的仿真计算结果如图 9 所示。

从图 9 中可以看出, 当 $d_1=0.24\ \mu\text{m}$ 时,

单元结构的插入损耗最小, 带宽最大。当 $d_1<0.24\ \mu\text{m}$ 时, 由于重叠区域的面积减小, 低频带宽变窄。当 $d_1>0.24\ \mu\text{m}$ 时, 低频带宽变宽, 但插入损耗骤增。

图 10 为高频下 FSS 的表面电流分布图。高频时, 电流主要分布在上下两层同心方环的内环和外环。这意味着第二谐振频率受上下两层同心方环的内外边长共同影响。固定内外环的边长差值, 改变内环边长, 得到了边长对 S 参数的影响图 (见图 11)。

高频情况的分析与低频情况相似。优化后选取 $L_2=9.00\ \mu\text{m}$, $L_3=6.16\ \mu\text{m}$, 使单元结构的带宽最宽、插入损耗最小。

当电磁波以不同角度入射到 FSS 单元时, 它们的 S 参数不尽相同。图 12 为入射角 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 和 45° 时 S 参数的仿真图。可以看出, FSS 单元结构在 $\theta\in[0,45^\circ]$ 范围内有较好的角度稳定性。即使入射角达到 45° 时, 回波损耗仍保持在 -10 dB 以下, 说明该单元结构的频率选择性较高, 且对入射角度具有较高的稳定性。

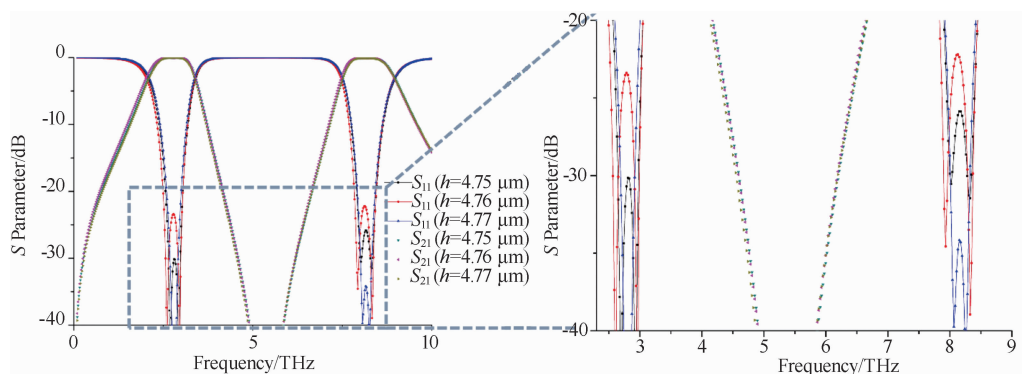


图 7 介质层厚度对 S 参数的影响

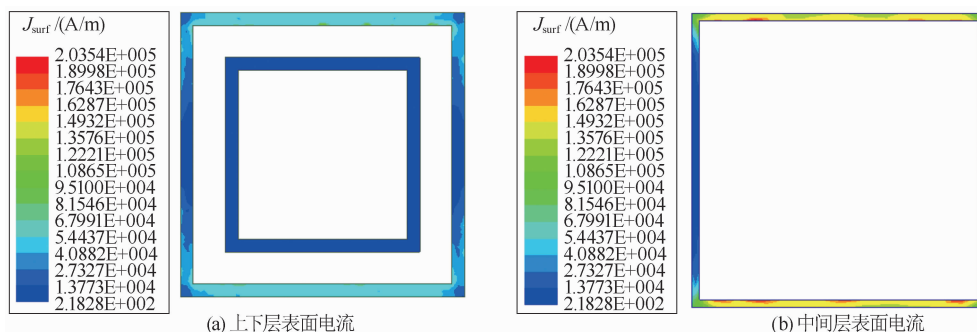


图 8 低频时 FSS 的表面电流分布

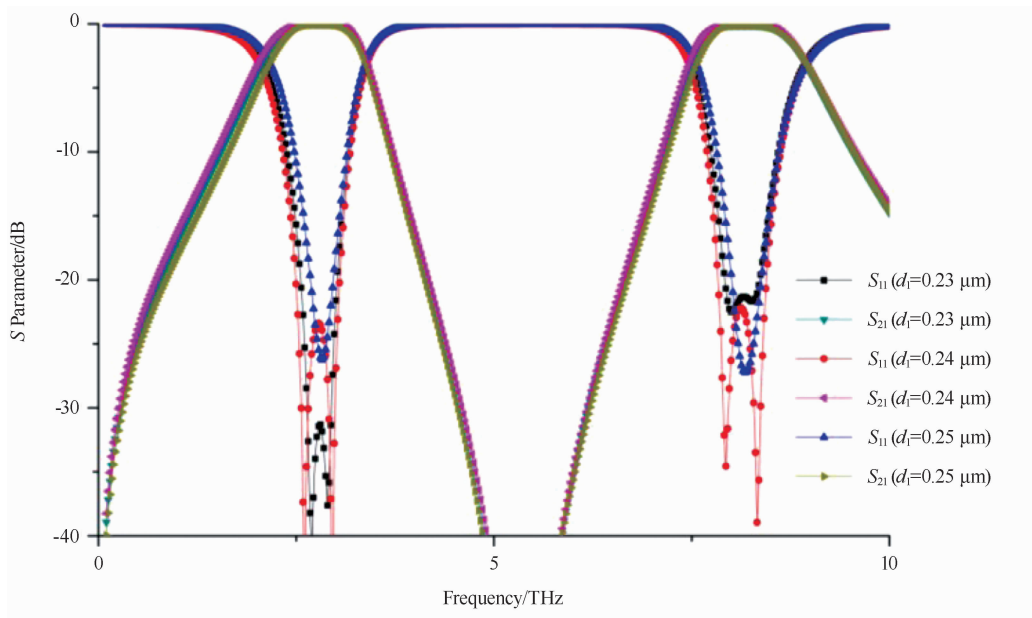


图 9 方形栅格宽度对 S 参数的影响

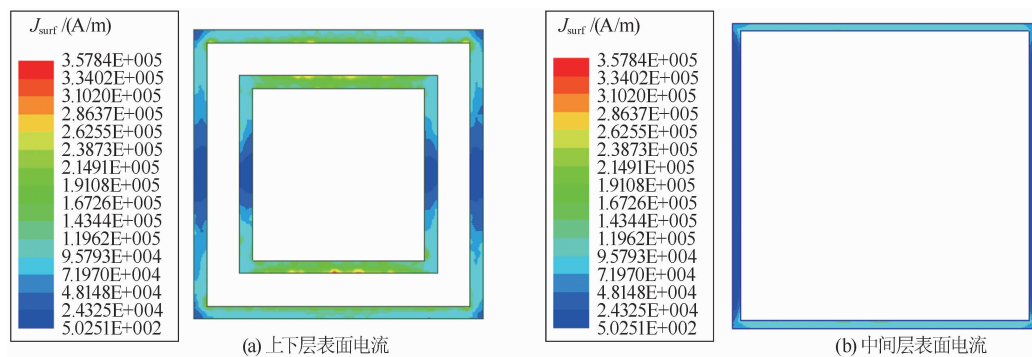


图 10 高频时 FSS 的表面电流分布

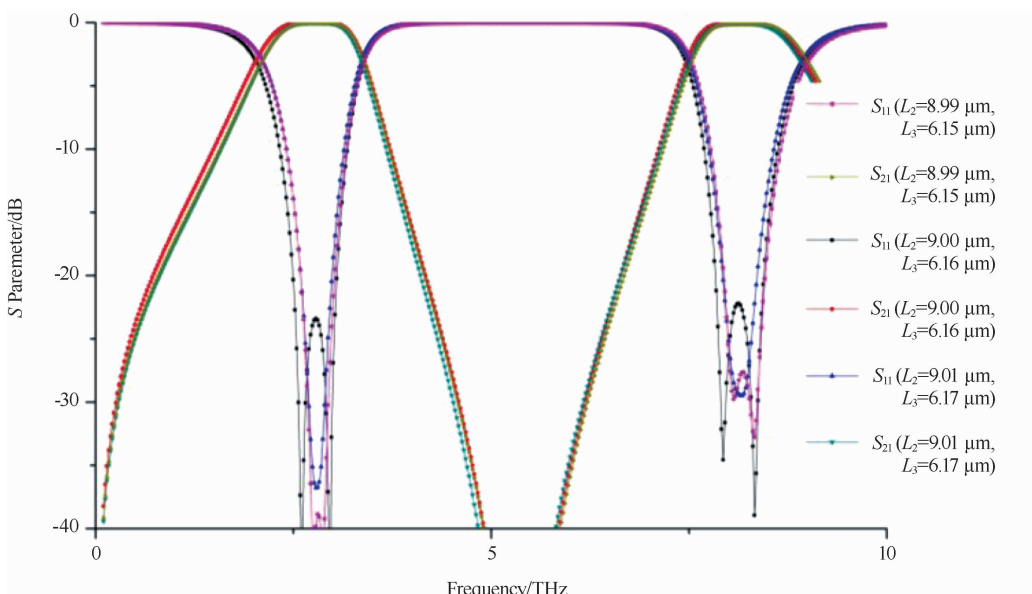


图 11 方形环边长对 S 参数的影响

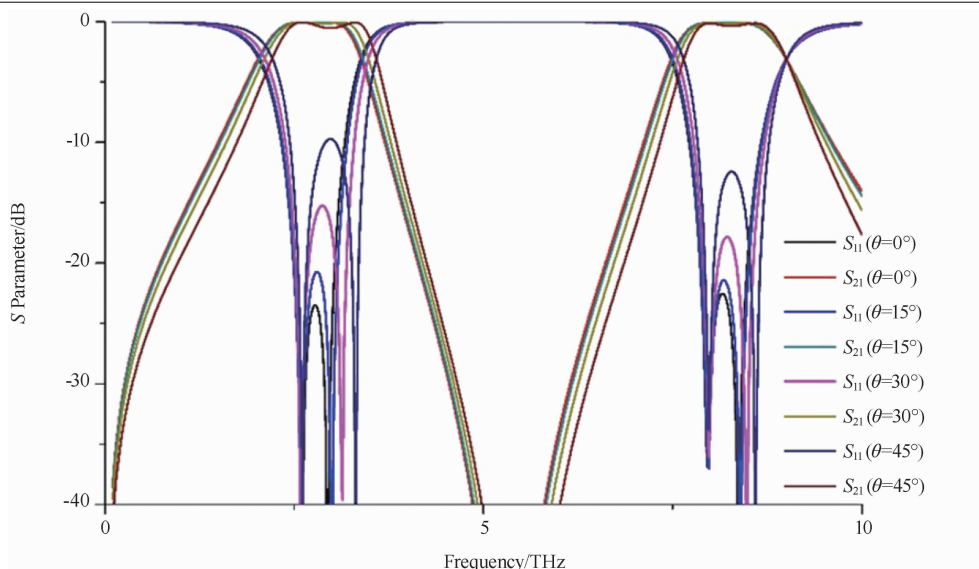


图 12 入射角对 S 参数的影响

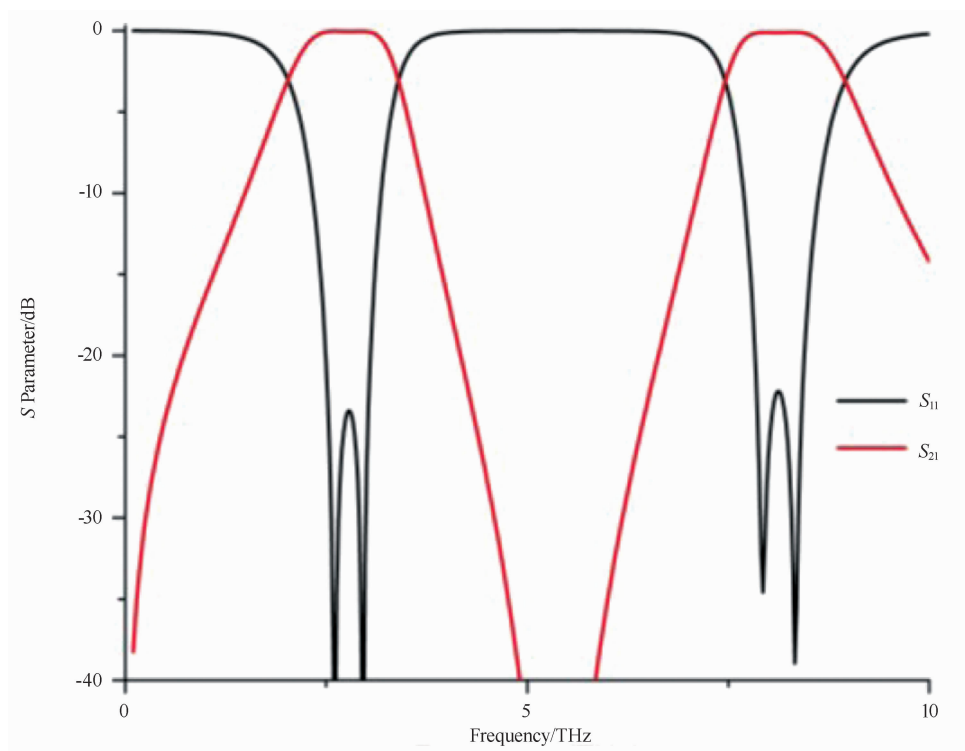


图 13 FSS 单元结构的 S 参数图

综合上面对介质板厚度、方形环边长、厚度、入射角等多项参数的分析,可以得到在几何结构优化后 FSS 单元的 S 参数曲线(见图 13)。从图 13 中可以看出,当频率为 0.1~10 THz 的电磁波正入射到 FSS 时,出现两个谐振点 2.18 THz 和 8.13 THz,与理论计算的近似值 2.91 THz 和 9.74 THz 基本一致。低频处的一 1 dB 通带出现在 2.24~3.25 THz 处,

相对带宽为 36.9%;高频处的一 1 dB 通带出现在 7.64~8.70 THz 处,相对带宽为 13.2%。该单元结构具有良好的频率选择性和角度稳定性,并可根据需求,通过改变 FSS 单元结构的几何尺寸来控制频率选择的情况。

3 结论

本文提出了一种基于频率选择表面的多层方形环结构,实现了 THz 频段的通带滤波器。

利用等效电路法对该 FSS 结构进行了理论分析。仿真结果验证了理论分析与近似计算。结果表明, 在 2.74 THz 和 8.17 THz 两个谐振频率附近出现了 THz 通带, 且低频处的 -1 dB 通带范围为 2.24~3.25 THz, 相对带宽为 36.9%, 插入损耗为 -0.05dB; 高频处的 -1 dB 通带范围为 7.63~8.71 THz, 相对带宽为 13.2%, 插入损耗为 -0.12 dB。该 FSS 器件结构图案简单, 易于加工; 且通带范围大、频率选择性好, 角度稳定性高; 单元尺寸较小, 仅为 $0.04\lambda \times 0.15\lambda \times 0.15\lambda$, 可实现小型化集成, 为将来设计双频带 FSS 提供了新的思路与方向。在未来的太赫兹通信特别是双工通信领域, 这种 FSS 器件结构将可发挥重要的作用。

参考文献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge Terahertz Technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97-105.
- [2] Taylor Z D, Singh R S, Bennett D B, et al. THz Medical Imaging; in vivo Hydration Sensing [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2011, **1**(1): 201-219.
- [3] 马静艳, 张忠皓, 李福昌, 等. 太赫兹通信关键技术与发展愿景 [J]. *邮电设计技术*, 2020, **20**(4): 1-5.
- [4] Ben A M. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [5] Behdad N. Miniaturized-element Frequency Selective Surfaces (MEFSS) Using Sub-wavelength Periodic Structures [C]. Orlando: 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, 2008.
- [6] Nguyen B D, Lanteri J, Dauvignac J Y, et al. 94 GHz Folded Fresnel Reflector Using C-Patch Elements [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2008, **56**(11): 3373-3381.
- [7] Yu Q M, Liu S B, Monorchio A, et al. A Miniaturized High Selectivity Frequency Selective Resonator Based on Sub-Wavelength Resonance and Interdigital Resonator [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, **18**(9): 1833-1837.
- [8] Li P, Chu H, Chen R S. Design of Compact Bandpass Filters Using Quarter-Mode and Eighth-Mode SIW Cavities [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 2020, **12**(2): 109-115.
- [9] Panwar R, Puthucheri S, Agarwala V, et al. Effect of Particle Size on Radar Wave Absorption of Fractal Frequency Selective Surface Loaded Multilayered Structures [C]. New Delhi: 2014 IEEE International Microwave and RF Conference (IMaRC), 2015.
- [10] Abdollahvand M, Forooraghi K, Encinar J, et al. A 20/30 GHz Reflectarray Backed by FSS for Shared Aperture Ku/Ka-Band Satellite Communication Antennas [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, **19**(4): 566-570.
- [11] Lee Y S. Principles of Terahertz Science and Technology [J]. *Contemporary Physics*, 2009, **53**(6): 526-527.
- [12] 姜聿焘, 张厚, 徐海洋, 等. 一种改进型的 Y 环双频带通 FSS [J]. *微波学报*, 2012, **28**(6): 72-75.
- [13] 张力力, 张晓渝, 徐峰, 等. 基于超材料结构高 Q 太赫兹滤波器的研究 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, **13**(5): 696-699.
- [14] Song X, Yan Z H, Zhang T L, et al. Triband Frequency-Selective Surface as Subreflector in Ku-, K-, and Ka-Bands [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2016, **15**(2): 1869-1872.
- [15] Fan Y, Qian Y, Yin S, et al. Multi-band Tunable Terahertz Bandpass Filter Based on Vanadium Dioxide Hybrid Metamaterial [J]. *Materials Research Express*, 2019, **6**(5): 055809.
- [16] 于正永, 朱建平. 双边带陡降带通三维频率选择表面研究 [J]. *无线电工程*, 2020, **50**(11): 963-969.
- [17] Langley R, Parkey E. Equivalent Circuit Model for Arrays of Square Loops [J]. *Electron Letter*, 1982, **18**(7): 294-296.

(下转第 42 页)

- method for retrieving clouds with satellite infrared radiances using the particle filter [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, **9**(11): 3919–3932.
- [17] Zhang Q, Yu Y, Zhang W M, et al. Cloud Detection from FY-4A's Geostationary Interferometric Infrared Sounder Using Machine Learning Approaches [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(24): 3035.
- [18] Lee A, Sohn B J, Pavelin E, et al. Assessment of cloud retrieval for IASI 1D-var cloudy-sky assimilation and improvement with an ANN approach [J]. *Weather and forecasting*, 2020, **35**(4): 1363–1380.
- [19] Min M, Wu C Q, Li C, et al. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, **31**(4): 708–719.
- [20] Saunders R, Hocking J, Turner E, et al. An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, **11**(7): 2717–2737.
- [21] McNally A P. A note on the occurrence of cloud in meteorologically sensitive areas and the implications for advanced infrared sounders [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, **128**(585): 2551–2556.

(上接第 25 页)

- [18] Ohira M, Deguchi H, Tsuji M, et al. Novel Waveguide Filters with Multiple Attenuation Poles Using Dual-behavior Resonance of Frequency-selective Surfaces [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2005, **53**(11): 3320–3326.
- [19] Marcuvitz N. *Waveguide Handbook* [M]. New York: McGraw-Hill, 1951.
- [20] Lee C K, Langley R J. Equivalent-circuit Models for Frequency-selective Surfaces at Oblique Angles of Incidence [J]. *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, 2008, **132**(6): 395–399.