光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023061402

# 基于频率选择表面的三通带太赫兹滤波器的设计与分析

潘 武，胡圣健*，朱子恒，谭明森
（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

**摘 要：** 目前三通带太赫兹滤波器存在通带带宽差异大的问题。为了提高太赫兹滤波器三通带的带宽均匀性，设计了一款基于频率选择表面的三通带太赫兹滤波器，其结构由三个嵌套式“十”字环金属贴片、“十”字金属贴片和聚酰亚胺衬底三层结构组成。当太赫兹波垂直入射到滤波器表面时，在0.1～0.862 THz范围内形成三个滤波通带，各通带的峰值透射系数约为0.9，具有较好的通带性能，并且通带之间的传输零点的透射系数都在0.07以下，带外抑制良好。各通带的3 dB带宽的最大通带比约为1.29，10 dB带宽的最大通带比约为1.13，具有较好通带均匀性。三个工作通带的矩形系数均大于1.7，通带边沿陡峭，频率选择性良好。该滤波器具有透射系数高、带宽差异小、结构简单和易于加工等特点，其在太赫兹的多信道通信领域具有广阔的应用前景。

**关键词：** 太赫兹；频率选择表面；滤波器；多通带；通带比
**中图分类号：** TN713 **文章编号：** 1001－5868(2023)05－0672－07

## Design and Analysis of Three-Band Terahertz Filter Based on Frequency Selective Surface

PAN Wu, HU Shengjian, ZHU Ziheng, TAN Mingsen
(College of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

**Abstract:** The current three-band terahertz filter have a problem of large difference in passband bandwidth. In order to improve the bandwidth uniformity of terahertz filter, a frequency-selective surface based terahertz filter is designed, which consists of three nested "cross" ring metal patches, "cross" metal patches and polyimide substrate. When the terahertz wave is vertically incident on the filter surface, three filter passbands are formed in the range of 0.1～0.862 THz, and the peak transmission coefficient of each passband is about 0.9, which has good passband performance, and the transmission coefficient of transmission zero between the passbands is below 0.07, and the out-of-band suppression is good. The maximum bandpass ratio of 3 dB bandwidth is about 1.29, and the maximum bandpass ratio of 10 dB bandwidth is about 1.13, which has good passband uniformity. The rectangular coefficients of the three working passbands are greater than 1.7, the passband edges are steep, and the frequency selectivity is good. The filter has the characteristics of high transmission coefficient, small bandwidth difference, simple structure and easy processing. It has broad application prospects in the field of terahertz multi-channel communication.

**Key words:** terahertz; frequency-selective surface; filter; multiband; passband ratio

## 0 引言

太赫兹(Terahertz，THz)波连接红外和微波，频率范围在0.1～10 THz之间，具有通带宽、方向性好、穿透力强和光子能量低等优点，在通信、成像、

**收稿日期：**2023－06－14.
* **通信作者：**胡圣健 **E-mail：**chertanis@foxmail.com

医疗诊断和材料检测等领域具有广阔的应用前景[1-3]。太赫兹通信中的关键问题之一是太赫兹信号随距离增加而衰减，对于多信道通信，每个通带衰减程度不同会使得太赫兹信号的通信质量受到严重影响，为了提高太赫兹多信道通信的质量，具有高的带宽均匀性的多通带滤波器就显得至关重要。

频率选择表面（Frequency-Selective Surface，FSS）通常是一种对不同频率、极化方式和入射角度的电磁波具有选择透过性的二维周期阵列结构[4-7]，当电磁波入射到 FSS 上时，呈现不同的带通或带阻特性，基于 FSS 设计的太赫兹多通带均匀滤波器，能够满足太赫兹通信领域的需要。

2018 年，Manikandan 等[8]设计出一种具有极化和角度稳定的太赫兹多通带滤波器。其具有三个边沿陡峭的通带，三个通带的 3 dB 带宽的最大与最小值之比约 2.5，带宽差异较大。2019 年，Niu 等[9]设计出一种由 U 型谐振器和金属分裂环（Split-Ring Resonator，SRR）组成的太赫兹四通带滤波器。第一、二通带的最大透射率接近 0.9，第三、四通带的最大透射率分别为 0.75 和 0.6，各通带的最大透射率差异较大。同年，Princy 等[10]也基于嵌套式六边形 SRR 设计的太赫兹多通带滤波器，在分别入射 TE 和 TM 极化的电磁波时，频谱曲线上具有不同数目的谐振点，极化稳定性较差。

本文基于嵌套式“十”字环金属贴片和“十”字金属贴片组合结构提出一种极化稳定的三通带滤波器，其单元结构由顶层金属图案、中间介质层和底层金属图案组成。该滤波器在 0.1～0.862 THz 之间存在三个通带，各通带的最大透射系数接近，均在 0.9 附近，而且各通带带宽也接近，显示出良好的通带均匀性。三个通带边沿陡峭，选择性良好。与文献[11]中设计的薄层介质的滤波器相比，本论文设计的滤波器在结构尺寸上更易制造。“十”字环结构的滤波器与方环结构的滤波器相比，各通带的峰值透射系数更大，彼此差异小，而且各通带的带宽均匀性更好。

## 1　理论分析

本文利用谱域法[12]来进行理论分析，谱域法是以平面波展开和傅里叶变换为基础的谱分解。在多种数值分析 FSS 的方法中，谱域法应用范围广泛。

入射波为 TE 极化或 TM 极化方向的平面波 $E^{\mathrm{inc}}$，入射方向为 $(\theta,\phi)$，波矢量为 $K_0^i$，在自由空间中，假设 FSS 为无限大平面周期阵列，单元结构为无限薄的理想导体（PEC），入射波为均匀平面波，则 FSS 表面的散射场表示为：

$$E^{\mathrm{s}}=-\mathrm{j}\mu_0\omega A+\frac{1}{\mathrm{j}\omega\varepsilon_0}\nabla(\nabla\cdot A) \tag{1}$$

式中，$A$ 是矢量磁位，$\mu_0$ 是真空磁导率，$\varepsilon_0$ 是真空介电常数，$\omega=2\pi c/\lambda$ 是入射波的角频率。FSS 贴片表面只存在切向电流，可以由下式计算：

$$\begin{bmatrix}A_x(x,y)\\A_y(x,y)\end{bmatrix}=\overline{\overline{G}}(x,y)\cdot\begin{bmatrix}J_x(x,y)\\J_y(x,y)\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，$\overline{\overline{G}}=(\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k_0r}/4\pi r)\overline{\overline{I}}$，$r=(x^2+y^2)^{1/2}$，其中 $\overline{\overline{G}}$ 表示并矢格林函数，$J_x$ 和 $J_y$ 是贴片上的感应电流，$k_0$ 是自由空间波数，$\overline{\overline{I}}$ 是单位并矢。将式(2)代入式(1)得：

$$-\begin{bmatrix}E_x^{\mathrm{inc}}\\E_y^{\mathrm{inc}}\end{bmatrix}=-\frac{\mathrm{j}\omega\mu_0}{k_0^2}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial^2}{\partial x^2}+k_0^2 & \dfrac{\partial^2}{\partial x\partial y}\\ \dfrac{\partial^2}{\partial x\partial y} & \dfrac{\partial^2}{\partial y^2}+k_0^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_x\\A_y\end{bmatrix} \tag{3}$$

由于 FSS 贴片单元表面的切向电场为零，即 $E_t^{\mathrm{inc}}+E_t^{\mathrm{s}}=0$，其中 $t$ 表示切向电场。对式(3)应用傅里叶变换，得到谱域表达式：

$$-\begin{bmatrix}E_x^{\mathrm{inc}}(x,y)\\E_y^{\mathrm{inc}}(x,y)\end{bmatrix}=\frac{1}{2\pi}\iint_{\infty}\frac{1}{\mathrm{j}\omega\varepsilon_0}\begin{bmatrix}k_0^2-\alpha^2 & -\alpha\beta\\ -\alpha\beta & k_0^2-\beta^2\end{bmatrix}\times\widetilde{G}\begin{bmatrix}\widetilde{J}_x\\\widetilde{J}_y\end{bmatrix}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\alpha x}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta y}\,\mathrm{d}\alpha\,\mathrm{d}\beta \tag{4}$$

式中，

$$\widetilde{G}=\begin{cases}\dfrac{-\mathrm{j}}{2\sqrt{k_0^2-\alpha^2-\beta^2}} & k_0^2>\alpha^2+\beta^2\\[2ex] \dfrac{1}{2\sqrt{k_0^2-\alpha^2-\beta^2}} & \text{其他}\end{cases} \tag{5}$$

利用 Floquet 定理，可得：

$$J(x)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}\widetilde{J}_{\mathrm{m}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(2m\pi/a+k_x^{\mathrm{inc}})x}$$

$$J(y)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}\widetilde{J}_{\mathrm{m}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(2m\pi/b+k_y^{\mathrm{inc}})y} \tag{6}$$

其中，$k_x^{\mathrm{inc}}$ 和 $k_y^{\mathrm{inc}}$ 分别表示 $x$ 和 $y$ 方向的入射波数，$a$ 和 $b$ 分别表示 $x$ 和 $y$ 方向的周期。将式(5)，(6)代入式(4)，可得：

$$-\begin{bmatrix}E_x^{\mathrm{inc}}(x,y)\\E_y^{\mathrm{inc}}(x,y)\end{bmatrix}=\frac{4\pi}{\mathrm{j}\omega\varepsilon_0 ab}\sum_m\sum_n\begin{bmatrix}k_0^2-\alpha_m^2 & -\alpha_m\beta_n\\ -\alpha_m\beta_n & k_0^2-\beta_n^2\end{bmatrix}\times$$

$$\widetilde{G}(\alpha_m,\beta_n)\begin{bmatrix}\widetilde{J}_x(\alpha_m,\beta_n)\\ \widetilde{J}_y(\alpha_m,\beta_n)\end{bmatrix}e^{j(\alpha_m x+\beta_n y)} \tag{7}$$

式中，

$$\alpha_m=2m\pi/a+k_x^{\mathrm{inc}}$$

$$\beta_n=2n\pi/(b\sin\Omega)+k_y^{\mathrm{inc}}-(2m\pi/a)\cos\Omega$$

其中，$\Omega$ 是 FSS 两周期方向的夹角，本文 $\Omega=90°$。被激发出的电流可以通过求解式(7)得到。根据巴比涅原理[13]互补结构的频率响应也互补，缝隙型 FSS 结构的频率响应可根据贴片型 FSS 结构得到。

## 2 结构设计与仿真

该太赫兹 FSS 滤波器采用金属-介质-金属经典结构，顶层由三个嵌套式“十”字环金属贴片构成，底层由长度为单元周期常数的“十”字金属贴片构成。顶层金属图案和底层金属贴片的材料为银(Silver)，电导率 $\sigma=6.3\times10^7$ S/m，厚度设为 0.2 μm。中间介质层的材料为有损聚酰亚胺(Polyimide)材料，其相对介电常数 $\varepsilon_r=3.5$，损耗角正切 $\tan\delta=0.0027$，电导率为 0，磁导率为 1。将该金属-介质-金属结构沿着 $x$ 和 $y$ 轴方向周期排列，TE 和 TM 极化方向的太赫兹入射波沿着轴方向垂直入射到结构表面。

若 FSS 结构使得入射电磁波发生分束，则透射过的电磁波能量不集中，滤波性能会下降。为了避免产生栅瓣，需要分析 FSS 结构产生栅瓣的条件。根据文献[14]得到：

$$\beta P_x(\sin\theta+\cos\alpha)=2n\pi \tag{8}$$

式中，$\beta=2\pi/\lambda_g=2\pi f_g/c$，$c$ 是光速，$f_g$ 是最早出现栅瓣的频率，$P_x$ 是 $x$ 方向上的单元周期，$\theta$ 是入射电磁波的入射角，$\alpha$ 是栅瓣可能出现的方向，其中最早出现在为零的方向，即平行于 FSS 结构的方向。假设最早出现栅瓣的频率 $f_g=0.9$ THz，当 $\theta=0°$，$\alpha=0°$，$n=1$ 时，即正入射时得到最大单元间隔 $P_x=P_y=333.10$ μm。在入射电磁波正入射的情况下，单元周期小于最大单元间隔，不会产生栅瓣。

根据 FSS 理论[15]，在 FSS 的单面加载介质时，FSS 结构的有效介电常数如下：

$$\varepsilon_{\mathrm{eff}}=\frac{\varepsilon_r+1}{2} \tag{9}$$

其中，$\varepsilon_r$ 是介质的相对介电常数。加载介质前的 FSS 单元结构的谐振波长设为 $\lambda_0=c/f_{\mathrm{stop}}$，则加载介质后的谐振波长为：

$$\lambda_g=\frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{eff}}}}=\frac{c}{f_{\mathrm{stop}}\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{eff}}}} \tag{10}$$

本文设计的滤波器需要具有三个均匀的通带。由于“十”字贴片的滤波特性，在频率接近零时的透射被几乎全反射，还需要设计分别在 0.3，0.6 和 0.9 THz 左右产生三个谐振频点使通带边沿陡峭，利用式(10)计算得到三个频点对应的波长分别为 666.21，333.10 和 222.07 μm。根据天线原理，“十”字环结构的臂长不足谐振波长的一半，可将“十”字环的臂长设为波长的 1/4～1/3，以“十”字环的臂长为基础，可以得出“十”字环的臂宽的长度。

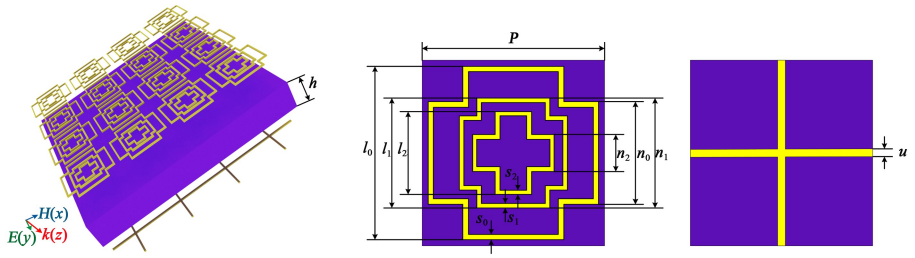
FSS 结构中的介质层除了可用做结构支撑，还会引起谐振频率漂移，影响工作带宽。根据传输线理论，如果介质层波阻抗与自由空间波阻抗不匹配，则电磁波在空气与介质的界面上会产生反射。当介质层厚度小于谐振频率的四分之一，介质层与谐振的 FSS 结构的反射叠加从而展宽共振带宽。假设谐振频率为 0.9 THz，则介质层厚度应该小于 55.52 μm。根据聚酰亚胺的数据表，选择厚度 50 μm。其他两个谐振频率低于 0.9 THz，此厚度同样满足它们对应的介质层厚度低于谐振波长四分之一的条件。

经过 FSS 理论分析和仿真优化后，得到的太赫兹 FSS 滤波器的单元结构如图 1 所示。滤波器单元结构的周期为 $P=182.0$ μm，顶层外金属“十”字环的长为 $l_0=165.6$ μm，宽为 $n_0=106.1$ μm，中间金属“十”字环环的长为 $l_1=105.0$ μm，宽为 $n_1=77.0$ μm，内金属“十”字环的长为 $l_2=77.0$ μm，宽为 $n_2=36.5$ μm。外环线宽 $s_0=5.3$ μm，中环线宽 $s_1=5.3$ μm，内环线宽 $s_2=4.38$ μm，底层“十”字金属贴片的宽度为 $u=4.0$ μm，长度为 $P$。顶层和底层金属 Silver 的厚度都为 $t=0.2$ μm，介质层的厚度为 $h=50.0$ μm。该单元结构在水平方向上具有旋转对称性。

利用 CST Microwave Studio 2022 的频域求解器对所设计的 FSS 滤波器结构的电磁特性进行建模仿真。如图 2 所示，该结构在 0.1～0.862 THz 范围内出现三个通带，它们周边还有三个谐振点为 $f_1=0.328$ THz，$f_2=0.594$ THz 和 $f_3=0.862$ THz。三个通带的峰值透射系数分别为 0.9006，0.9058 和 0.8940，差别小于 0.012，该滤波曲线各通带透射性良好，通带间差异细微。三个传输零点的透射系数分别为 0.0186，0.0552 和 0.0656，均在 0.07 以下，阻带特性良好。另外，该滤波器对 TE 极化和 TM 极化的太赫兹波表现出相似的滤波特性，显示出该滤波器极化稳定性良好。

通带比是指多个通带间的带宽比，通带间的最大通带比越小，越接近 1，通带间带宽差异越小，通带越均匀。本文设计的三通带滤波器的 3 dB 带宽分别为 94，94 和 122 GHz，3 dB 带宽的最大通带比约 1.29。10 dB 带宽分别为 206，186 和 212 GHz，10 dB 带宽的最大通带比约 1.13。

矩形系数 $SF=BW_{10\,dB}/BW_{3\,dB}$ 能够描述透射峰的边沿陡峭度，透射峰的矩形系数越接近 1，通带越陡峭，选择性越好。本文设计的滤波器的三个通带的矩形系数分别为 2.19，1.98 和 1.74，通带的边沿陡峭，频率选择性良好。




（a）滤波器 4×4 阵列图　　（b）顶层结构　　（c）底层结构

图 1　滤波器结构示意图

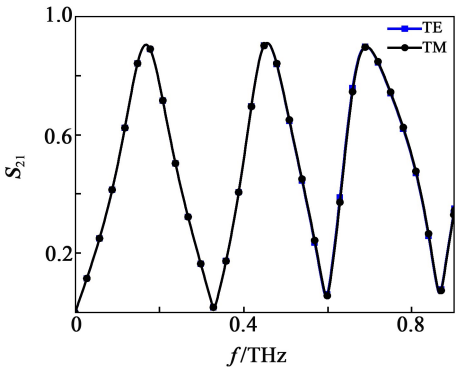
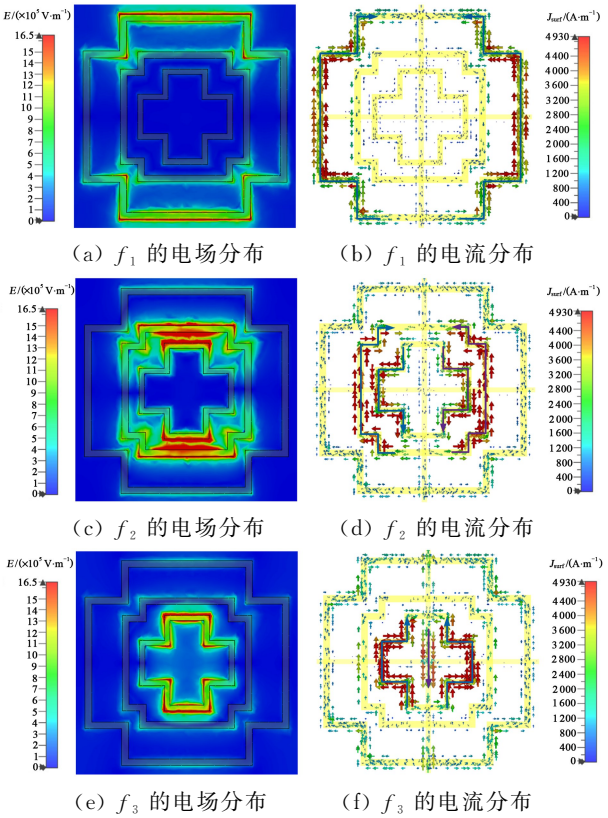



图 2　太赫兹 FSS 滤波器透射谱

## 3　FSS 滤波器的电磁谐振机理

当 TE 极化方向的太赫兹波沿 z 轴垂直照射到结构表面时，查看谐振频点 0.328，0.594 和 0.862 THz 处的电场和电流分布如图 3 所示。如图 3(a)，在第一频点处，电场能量集中在外环上，环上有一组同相电流，而且 y 方向上相邻单元之间有耦合，主要是由外环的 LC 谐振产生的。如图 3(b)，在第二频点处，电场能量集中在中环和内环上，中环上有一组同相电流，内环上也有一组同相电流，两组电流方向相反，主要是由内环和中环之间的两组 LC 谐振引起的。如图 3(c)，在第三频点处，电场集中在内环上，环上有一组同相电流，主要是偶极子谐振产生的。底面“十”字金属贴片上，平行于电场方向的直杆上也有电场分布，主要是高阶谐振引起的。以上三个谐振频率产生的机理各不相同，形成了不同的表面电流分布。




（a）$f_1$ 的电场分布　（b）$f_1$ 的电流分布

（c）$f_2$ 的电场分布　（d）$f_2$ 的电流分布

（e）$f_3$ 的电场分布　（f）$f_3$ 的电流分布

图 3　在入射 TE 极化的电磁波时，三个频点处的电场分布和电流分布

## 4　结构形态对滤波性能的影响

保持其他参数不变，研究滤波器结构形态对滤波器的影响，如图 4 所示。与整体滤波器结构相比，去掉单独某个金属单元会对滤波器的滤波曲线产生重大影响。

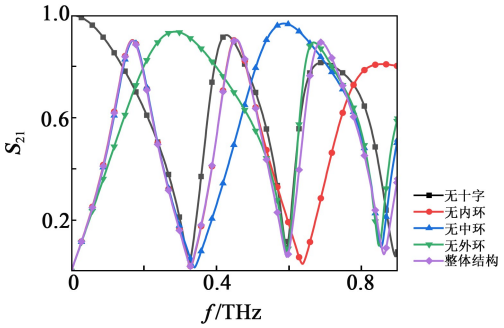



图 4 结构形态对透射系数的影响

外环的 LC 谐振产生第一频点，去掉外环后则第一频点消失。而中环与第二频点有关，去掉中环后则第二频点消失。内环与第二频点有关，还是产生第三频点的主要结构，去掉内环后则第三频点消失，第二频点蓝移。由于底层“十”字的长度和滤波器单元结构的周期常数一致，显示出太赫兹滤波器中低层“十”字的直杆是彼此相接的。根据 LC 谐振理论，直杆越长等效电感越大，底层“十”字的长度接近无穷时，对应的谐振接近零，使得频率接近零时发生电磁波全反射，形成第一通带的上升沿，去掉“十”字后第一通带的上升沿消失。另外，“十”字还与第三频点有关，去掉“十”字后还会引起第三频点的微小蓝移。

## 5 结构参数变化对滤波性能的影响

### 5.1 单元结构周期 $P$ 对滤波性能的影响

在保持其他参数不变的条件下，将单元结构周期 $P$ 设置为 170，180，190 和 200 μm，得到太赫兹滤波器透射系数曲线，如图 5 所示。随着 $P$ 的增大，第一个通带的透射会增加，透射峰升高了 0.048。第一频点蓝移了 0.076 THz，第三频点红移了 0.05 THz。因为 $P$ 的增大减少了相邻单元结构之间的耦合，入射波的能量被滤波器结构的吸收变少，导致第一通带的峰值透射系数增加和第三频点的带外抑制变小。根据 $f=1/\sqrt{LC}$ 和 $C=\varepsilon S/d$ 可知，$P$ 的增大使得水平方向上单元结构之间的距离增大，外环等效电容减小，第一频点蓝移。另外，结构之间耦合减弱使得内环电场增强，表面电流密度变大，从而增大内环等效电容，引起第三频点红移。

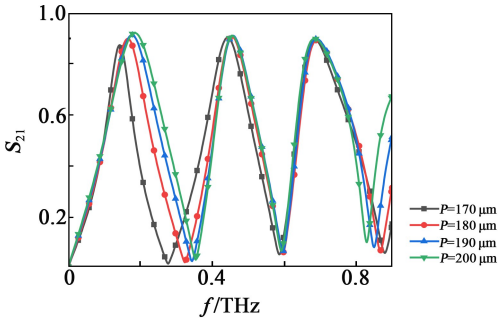



图 5 周期 $P$ 对透射系数的影响

### 5.2 环尺寸对滤波性能的影响

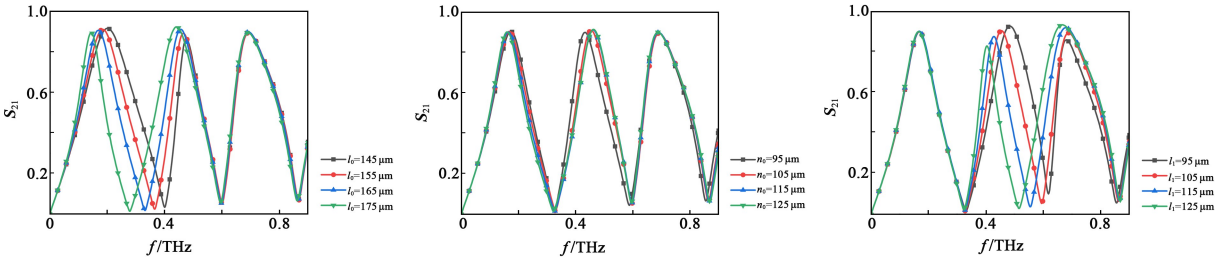
如图 6 示出外环、中环和内环的长、宽变化对频谱中的频点和通带的影响。

外环尺寸 $l_0$ 设置成从 145 μm 增大到 175 μm，$n_0$ 设置成从 95 μm 增大到 125 μm。外环尺寸越大，第一、二通带的透射会略微增加。当外环的长 $l_0$ 增大时，第一频点红移了 0.12 THz，第一通带的 3 dB 带宽减少了 0.074 THz，10 dB 带宽减少了 0.126 THz。第二通带的 3 dB 带宽增加了 0.046 THz，10 dB 带宽增加了 0.082 THz。当外环的宽 $n_0$ 增大时，第一通带的带宽略微减少，3 dB 带宽减少了 0.012 THz，10 dB 带宽减少了 0.018 THz。第二通带发生蓝移，峰顶蓝移了 0.03 THz。

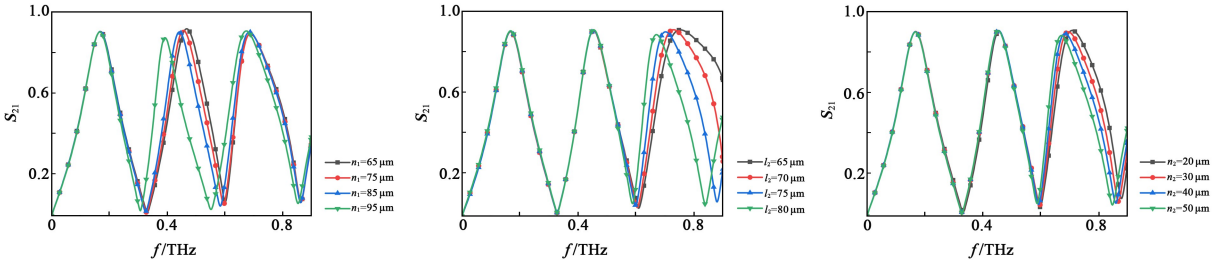
中环尺寸 $l_1$ 设置成从 95 μm 增大到 125 μm，$n_1$ 设置成从 65 μm 增大到 95 μm。中环尺寸越大，第二通带透射减少，第三通带透射增加，第二频点红移，并且谐振强度增加，导致谐振点处的传输系数更小。当中环的长 $l_1$ 增大时，第二通带带宽显著减少，3 dB 带宽减少了 0.066 THz，10 dB 带宽减少了 0.096 THz。第三通带带宽显著增加，3 dB 带宽增加了 0.062 THz，10 dB 带宽增加了 0.09 THz。第二频点红移明显，红移了 0.102 THz。当中环的宽 $n_1$ 增加时，第二通带显著红移，峰顶红移了 0.076 THz。第三通带略微红移。第二频点红移了 0.05 THz。

内环尺寸 $l_2$ 设置成从 65 μm 增大到 80 μm，$n_2$ 设置成从 20 μm 增大到 50 μm。内环尺寸越大，第三通带的下降沿逐渐陡峭。当内环的长 $l_2$ 增大时，第三频点显著红移，红移了 0.116 THz。第三通带带宽显著减少，3 dB 带宽减少了 0.112 THz，10 dB 带宽减少了 0.096 THz。而且第三通带略微红移，峰顶红移了 0.082 THz。当内环的宽 $n_2$ 增大时，第三通带的下降段红移，第三频点略微红移了 0.03 THz。

以上数据表明“十”字环的臂长是控制三个频点移动的主要参数，而“十”字环的臂宽是控制频点移动的次要参数，臂宽的变化主要影响各通带的带宽。“十”字环的尺寸是控制三通带均匀性的主要参数。




（a）外环尺寸 $l_0$ 的变化　（b）外环尺寸 $n_0$ 的变化　（c）中环尺寸 $l_1$ 的变化




（d）中环尺寸 $n_1$ 的变化　（e）内环尺寸 $l_2$ 的变化　（f）内环尺寸 $n_2$ 的变化

图 6　三环尺寸的变化对滤波性能的影响

### 5.3　线宽对滤波性能的影响

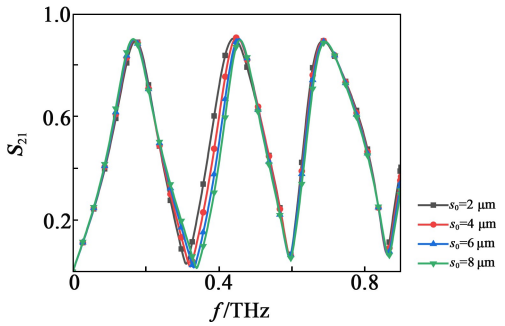
金属线宽影响滤波器的电场分布，从而影响滤波性能，如图 7，通过三个环的线宽的变化来改变频谱中频点位置和通带的带宽大小。外环线宽 $s_0$ 设置从 2 μm 增大到 8 μm。外环线宽 $s_0$ 越宽，第一频点略微蓝移，蓝移了 0.028 THz，第二通带的上升段蓝移，第二通带的 3 dB 带宽减少约 0.03 THz，10 dB 带宽减少约 0.038 THz。

中环线宽 $s_1$ 设置成从 2 μm 增大到 8 μm。中环线宽 $s_1$ 越宽，第二频点显著蓝移，蓝移了 0.062 THz，第二通带的下降沿与第三通带的上升段蓝移，第二通带的 3 dB 带宽增加了 0.03 THz，10 dB 带宽增加了 0.054 THz。第三通带的 3 dB 带宽减少了 0.052 THz，10 dB 带宽减少了 0.062 THz。

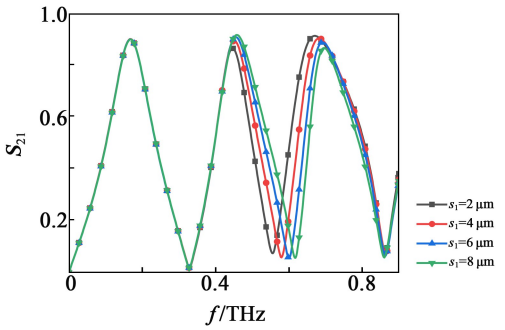
内环线宽 $s_2$ 设置成从 2 μm 增大到 8 μm。内环线宽 $s_2$ 越宽，第一、二通带和第一、二频点没有变化，第三通带的透射增大了 0.077，第三通带的 3 dB 带宽增加了 0.086 THz，10 dB 带宽增加了 0.106 THz。第三频点蓝移了 0.108 THz。

“十”字线宽 $u$ 设置成从 2 μm 增大到 10 μm。“十”字线宽 $u$ 越宽，第一、二通带的透射略微下降，下降了 0.05，第一通带 3 dB 带宽减少了 0.02 THz，10 dB 带宽减少了 0.028 THz。第三频点略微红移了 0.014 THz。

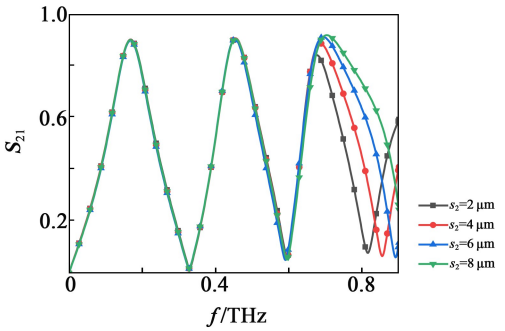
线宽参数是精确调节三个通带带宽的重要参数。以上数据显示出外环、中环、内环和“十”字线宽



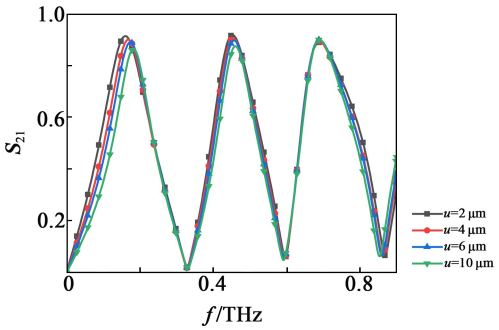

（a）外环线宽 $s_0$ 的变化对滤波性能的影响




（b）中环线宽 $s_1$ 的变化对滤波性能的影响




（c）内环线宽 $s_2$ 的变化对滤波性能的影响




(d) “十”字线宽 $u$ 的变化对滤波性能的影响

图 7 外环线宽 $s_0$、中环线宽 $s_1$、内环线宽 $s_2$ 和“十”字线宽 $u$ 的变化对滤波性能的影响

的变化可以分别影响三个频点的移动和各通带带宽的变化。在改变“十”字环的长和宽以控制三通带的频点和带宽后，通过多个线宽参数的变化来精确调节各通带的频点和带宽，可实现接近于 1 的最大通带比。

## 6 结论

基于嵌套式“十”字环金属贴片和“十”字金属贴片组合结构设计了一种太赫兹三通带均匀滤波器，讨论了单个结构缺失对滤波器滤波特性的影响，分析了三个频点的谐振原理。通过对结构的仿真分析，太赫兹滤波器在 0.1～0.862 THz 处存在三个均匀的通带，三个通带的峰值透射系数接近，带宽接近，传输零点足够低。具有良好的矩形系数，通带的边沿陡峭，频率选择性良好，并且在太赫兹波段内对于 TE 和 TM 极化入射波具有极化不敏感的特性，使用灵活。此外，该太赫兹滤波器在结构尺寸上易于加工，在太赫兹通信领域具有广阔的应用前景。

**参考文献：**

[1] Muller R, Bohmeyer W, Kehrt M, et al. Novel detectors for traceable THz power measurements [J]. J. of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2014, 35(8): 659-670.

[2] Yi L, Nishida Y, Sagisaka T, et al. Towards practical terahertz imaging system with compact continuous wave transceiver[J]. J. of Lightwave Technol., 2021, 39(24): 7850-7861.

[3] Jornet J M, Akyildiz I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band [J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3211-3221.

[4] Kapoor A, Mishra R, Kumar P. Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications[J]. Alexandria Engin. J., 2022, 61(6): 4263-4293.

[5] Ruan J F, Tao Z, Zou R Z, et al. A compact terahertz frequency selective surface with fast roll－off characteristics [J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 2022, 55(46): 465103..

[6] Shen X P, Cui T J, Zhao J M, et al. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber [J]. Opt. Express, 2011, 19(10): 9401-9407.

[7] Rashid A K, Li B, Shen Z X. An overview of three-dimensional frequency-selective structures[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2014, 56(3): 43-67.

[8] Manikandan E, Sreeja B S, Radha S, et al. A rapid fabrication of novel dual band terahertz metamaterial by femtosecond laser ablation[J]. J. of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2019, 40(1): 38-47.

[9] Niu Q S, Tang C, He Y H, et al. Design of multiple-band filtering resonance devices at narrow frequency range using terahertz metamaterial resonator[J]. Opt. Communications, 2019, 453:124368.

[10] Princy S S, Sreeja B S, Manikandan E, et al. Design of polarisation-dependent multiband terahertz frequency-selective surface using two resonators [J]. Pramana-J. Phys., 2019, 92(6):1-5.

[11] Li H P, Fu W Y, Shen X P, et al. Design and theoretical study of a polarization-insensitive multiband terahertz metamaterial bandpass filter[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(12):127801.

[12] 邓鹤栖，黄 建，李 光. 基于频率选择表面的太赫兹带通滤波器的研究[J]. 微波学报，2012，28(S1)：139-142.
Deng Heqi, Huang Jian, Li Guang. Simulation and design of bandpass filter based on frequency selective surface in terahertz wave band[J]. J. of Microwaves, 2012, 28(S1): 139-142.

[13] Zhang Y X, Qiao S, Zhao T, et al. Planar symmetric normal and complementary three-resonance resonators in terahertz band[J]. Progress in Electromagnetics Research-Pier, 2012, 125: 21-35.

[14] 王 婕，邓 晖，董金明. FSS 设计中栅瓣现象的研究[J]. 电子测量技术，2010，33(1)：25-28.
Wang Jie, Deng Hui, Dong Jinming. Study on the sidelopes for FSS design[J]. Electronic Measurement Technol., 2010, 33(1): 25-28.

[15] Biber S, Bozzi M, Gunther O, et al. Design and testing of frequency-selective surfaces on silicon substrates for submillimeter-wave applications [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2006, 54(9): 2638-2645.

**作者简介：**

**潘 武**(1966－)，男，四川省大英县人，博士，教授，主要从事太赫兹技术、超介质材料及应用研究；

**胡圣健**(1999－)，男，湖南省津市人，硕士研究生，研究方向为太赫兹滤波器。