

基于齿状缺陷地的宽阻带交叉耦合 SIW 滤波器

余金川¹, 吴志强¹, 王凯¹, 陈耀忠¹, 陈言¹, 李正雄¹, 张胜²

(1. 北方信息控制研究院集团有限公司, 江苏 南京 211153;

2. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:提出了一种齿状缺陷地低通传输线结构,该低通传输线由多级齿状缺陷地构成,通过调节齿状缺陷地枝节长度,可以有效调节低通和阻带频率范围。利用该齿状缺陷地结构,级联交叉耦合扇形基片集成波导(SIW)滤波器,该文设计了一款高带外抑制的宽阻带滤波器,与传统 SIW 带通滤波器相比,其矩形系数 $K_{40\text{ dB}}=2$,阻带范围大于 2 倍的中心频率,具有较好的通带和阻带选择特性。测试结果表明,滤波器的中心频率为 10.35 GHz,3 dB 和 40 dB 带宽分别为 507 MHz 和 1.05 GHz,插入损耗优于 1.47 dB,与仿真结果基本一致。

关键词:缺陷地结构;基片集成波导;交叉耦合;滤波器;宽阻带

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Wide Stopband Cross-Coupled SIW Filter Based on Tooth-Shaped Ground Defect

SHE Jinchuan¹, WU Zhiqiang¹, WANG Kai¹, CHEN Yaozhong¹, CHEN Yan¹,

LI Zhengxiong¹, ZHANG Sheng²

(1. Northern Information Control Research Institute Group Co., Ltd, Nanjing 211153, China;

2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: A low-pass transmission line structure with multi-level, tooth-shaped defects is proposed. The low-pass frequency and attenuation-band range could be effectively adjusted by varying the length of the branch of a tooth-shaped defect. A wide-stopband filter with high out-of-band suppression was designed by cascading cross-coupled fan-shaped SIW filters using this tooth-shaped defect ground structure. Compared to traditional SIW bandpass filters, the rectangular coefficient, $K_{40\text{ dB}}$, had a value of two, and the stopband range was greater than twice the center frequency, demonstrating good passband and stopband selection characteristics. The test results showed that the filter's center frequency was 10.35 GHz, with 3 dB and 40 dB bandwidths of 507 MHz and 1.05 GHz, respectively. The insertion loss was better than 1.47 dB, which was consistent with the simulation results.

Key words: DGS structure; substrate integrated waveguide; cross-coupled; filter; wide stopband

0 引言

基片集成波导(SIW)滤波器具有高通特性,能够传输高于截止频率的基模和高次模,但这种全波响应特性使得 SIW 滤波器具有较窄的阻带。为了能够实现 SIW 滤波器较好的带阻特性,专家学者们通过构造正负耦合路径在通带外产生传输零点^[1-3]来实现滤波器的高带外抑制特性,但这些交叉耦合带通滤波器仅能提高通带边沿的带阻特性,其阻带带宽仍然较窄,无法抑制高次谐波。为了实现滤波

器的宽阻带特性,在文献[4-5]中,通过增加其他传输线结构,有效提高了滤波器的阻带带宽,但阻带宽度仅能抑制一次谐波。在文献[6-8]中,多级缺陷地具有较好的低通和带阻特性,能够抑制高次模式,但整体尺寸较大。因此,综合考虑滤波器边带抑制、阻带带宽和结构尺寸等因素,本文提出了一种齿状缺陷地传输线结构,利用其低通和带阻特性设计了一款宽阻带的 SIW 带通滤波器。提出的缺陷地低通传输线能够在不增加结构面积的基础上,

收稿日期:2023-12-28

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2019GF12)

作者简介:余金川(1993-),男,江苏省南京市人,工程师,硕士生。

有效抑制 SIW 带通滤波器的一、二次谐波,其阻带范围大于 2 倍中心频率,实现了滤波器的宽阻带特性。同时,本文引入 S 型槽线结构产生了一条负耦合路径,通过交叉耦合的方式在滤波器带外产生了 4 个传输零点(TZ_s),有效地提升了带通滤波器的边沿抑制效果,矩形系数 $K_{40\text{ dB}}=2$ 。

1 实验

1.1 齿状低通传输线设计与分析

图 1(a)为提出的齿状缺陷地(DGS)低通传输线结构,该传输线由 3 个级联的一阶 H 型 DGS 和微带传输线组成,具有低通传输特性。图 1(b)为采用了 3 阶切比雪夫低通滤波器原型作为齿状缺陷地传输线的等效电路,查表有元件值 $g_0 = g_4 = 1.0$, $g_1 = g_3 = 0.679\ 86$, $g_2 = 1.177\ 02$ ^[10]。

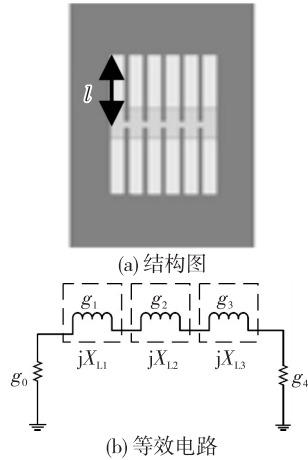


图 1 齿状缺陷地

图 2 为齿状缺陷地每个谐振点的等效电路。等效电路中的电容、电感^[9-10]分别为

$$C_i = \frac{1}{2\pi Z_0 g_i} \cdot \frac{f_c}{f_0^2 - f_c^2} \quad (1)$$

$$L_i = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \quad (2)$$

式中: $Z_0 = 50\ \Omega$ 为标准阻抗; f_0 为谐振点中心频率, f_c 为低通滤波器的截止频率。

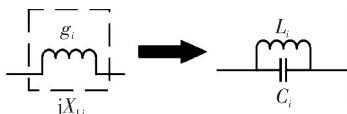


图 2 齿状缺陷地每个谐振点的等效电路

如图 3(a)所示,采用 HFSS 进行验证,测量齿状缺陷地传输线结构的低通截止频率为 20.1 GHz,谐振点频率分别为 12 GHz,17.8 GHz。如图 3(b)所示,随着齿状缺陷地枝节长度 l 的增加,滤波器的

低通截止频率不断降低,阻带频率范围也随之改变。

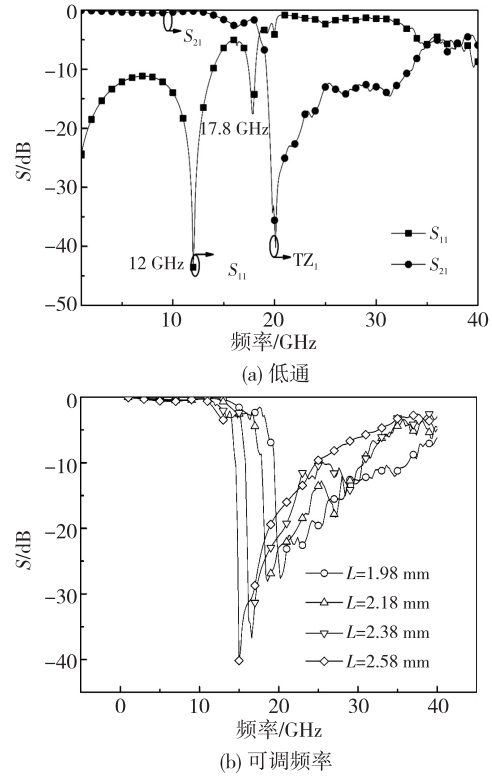


图 3 滤波器仿真 S 参数

1.2 交叉耦合 SIW 滤波器设计与分析

图 4 分别为四阶交叉耦合 SIW 带通滤波器的仿真结构图、等效电路图以及滤波器的耦合拓扑图。

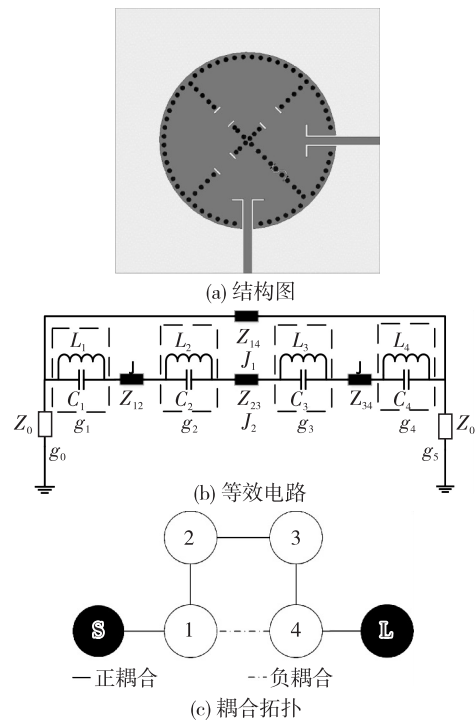


图 4 交叉耦合滤波器

如图 4(a) 所示,四阶交叉耦合滤波器分别由 4 个 SIW 谐振腔、2 个共面波导、3 个耦合窗及一对 S 槽线组成,其中心频率由扇形 SIW 谐振腔决定。如图 4(b) 所示,设计的滤波器等效电路分别由 4 个 LC 谐振电路、2 个匹配电阻 Z_0 、3 个正耦合阻抗 (Z_{12} 、 Z_{23} 、 Z_{34}) 及 1 个负耦合阻抗 Z_{14} 组成。如图 4(c) 所示,四阶交叉耦合带通滤波器具有 S-1-2-3-4-L 和 S-1-4-L 两条传输路径,其中 S-1-2-3-4-L 为正耦合路径,S-1-4-L 为负耦合路径,正耦合路径形成通带,正负耦合路径相位相差 180° ,在通带外产生零点。

根据正向设计方法,设计的滤波器采用对称四极点高选择滤波器原型,查表有基本元件值 $g_0 = g_5 = 1.0, g_1 = g_4 = 0.95974, g_2 = g_3 = 1.42192, J_1 = -0.21083, J_2 = 1.11769^{[10]}$ 。依照设计指标,四阶滤波器的通带中心频率为 10.3 GHz,带宽为 500 MHz。其相对带宽 FBW 、谐振腔间耦合系数 $M_{i,j}$ 和外品质因数 $Q_e^{[9-10]}$ 分别为

$$FBW = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (3)$$

$$Q_e = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad (4)$$

$$M_{1,2} = M_{3,4} = \frac{FBW}{\sqrt{g_1 g_2}} \quad (5)$$

$$M_{2,3} = \frac{FBW \cdot J_2}{g_2} \quad (6)$$

$$M_{1,4} = \frac{FBW \cdot J_1}{g_1} \quad (7)$$

依照式(3)-(7),结合仿真参数四阶交叉耦合带通滤波器的耦合矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.833 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.833 & 0 & 0.729 & 0 & -0.1 & 0 \\ 0 & 0.729 & 0 & 0.667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.667 & 0 & 0.729 & 0 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0.729 & 0 & 0.833 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.833 & 0 \end{bmatrix}$$

根据获得的耦合矩阵提取 $M_{i,i+1}$ 和 Q_e ,则图 4(b) 中的等效电路参数值^[9-10]:

$$C = \frac{Q_e}{\omega_0 Z} \quad (8)$$

$$L = \frac{Z_0}{\omega_0 Q_e} \quad (9)$$

$$Z_{i,i+1} = \frac{Z_0}{Q_e |M_{i,i+1}|} \quad (10)$$

式中: L, C 为谐振电路的电感和电容; ω_0 为中心角频率; $Z_0 = 50 \Omega$ 为匹配阻抗; $Z_{i,i+1}$ 为耦合阻抗。

如图 5 所示,采用 HFSS 仿真工具进行验证,带通滤波器 S 参数滤波器中心频率为 10.35 GHz,插损为 1.35 dB,带宽为 510 MHz,带外共用 4 个传输零点 (TZ_1-TZ_4),该滤波器具有较好的频率选择特性,但阻带仍较窄。

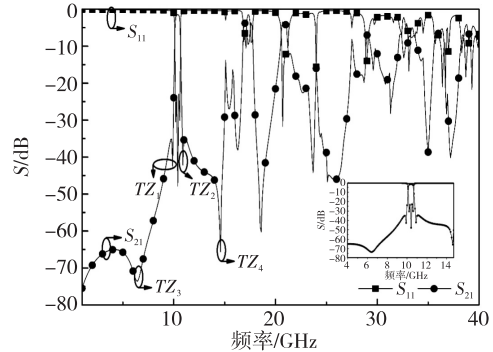
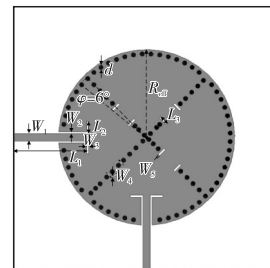


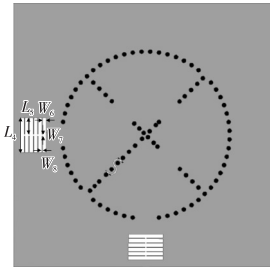
图 5 带通滤波器仿真 S 参数

1.3 整体滤波器设计

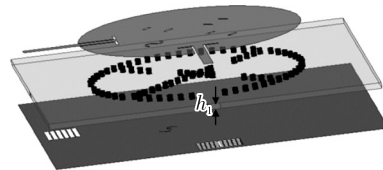
如图 6 所示,利用齿状缺陷地的低通特性和交叉耦合 SIW 滤波器的带通特性,通过结构叠加的方式设计了一款高带外抑制的宽阻带滤波器。该滤波器的工作频率为 10.35 GHz,分数带宽为 4.8%,



(a) 上表面



(b) 下表面



(c) 3D 结构

图 6 滤波器结构图

4个传输零点分别位于5.9 GHz、9.9 GHz、11 GHz和11.5 GHz, 40 dB矩形系数 S_F ^[9-10]为

$$S_F = \frac{f_u^{40\text{ dB}} - f_l^{40\text{ dB}}}{f_u^{3\text{ dB}} - f_l^{3\text{ dB}}} \quad (11)$$

式中: $f_u^{40\text{ dB}}, f_l^{40\text{ dB}}$ 分别为40 dB衰减处的上、下边沿频率; $f_u^{3\text{ dB}}, f_l^{3\text{ dB}}$ 分别为3 dB衰减处的上、下边沿频率。由式(11)可得 $S_F=2$ 。

选用介质为Rogers RT/duriod 6006 ($\epsilon_r=6.15, \mu_r=1, \tan \delta=0.019$)、厚度 $h=0.635$ mm的板材进行加工和指标测试,加工尺寸如表1所示。表中, R_{eff} 为谐振腔等效半径。

表1 滤波器的尺寸 mm

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	W_1	W_2	W_3
8.42	1.4	1	3.96	1.88	0.86	0.2	0.2
W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	d	R_{eff}	h_1
0.1	0.2	0.4	0.2	0.1	0.5	9.45	0.635

2 实验结果与讨论

图7为高带外抑制宽阻带4阶交叉耦合SIW滤波器的仿真、实测数据及实物图。由图7(a)可知,仿真数据与实测数据较吻合。滤波器的测试结果表明,通带中心频率为10.35 GHz, 3 dB和40 dB带宽分别为507 MHz和1.05 GHz, 矩形系数为2, 通带插入损耗优于1.47 dB, 回波损耗优于20 dB, 并且其阻带带宽为 $2.3f_0$, 能够抑制一次、二次谐波

表2 高抑制滤波器比较

文献	衰减带	尺寸/ λ_g	层数	f_0 /GHz	IL/dB	TZ_s	矩形系数
[1]	$<f_0$	3×3	3	21	0.6	2	>2
[2]	$<f_0$	1.2×1.2	1	4.5	2.7	4	—
[3]	$<f_0$	1×1	1	9.7	0.4	2	<2
[5]	$>20\text{ dB}; >f_0; <2f_0$	1×1	1	10.07	1.06	3	—
本文	$>20\text{ dB}; 2.3f_0$	1×1	1	10.35	1.47	4	2

3 结束语

本文提出了一种齿状缺陷地低通传输线结构,该传输线结构在不增加面积的基础上有效地实现了交叉耦合SIW带通滤波器的宽阻带特性。设计的滤波器具有高带外抑制和宽阻带的特性,与传统SIW滤波器相比,该滤波器的40 dB矩形系数为2。同时,采用S槽线结构,在带外产生了4个传输零点,

同时,滤波器在带外产生了4个传输零点(TZ_1-TZ_4),带外抑制优于35 dB。受加工精度的影响,滤波器实测、仿真结果存在误差,图7(b)为滤波器加工实物。

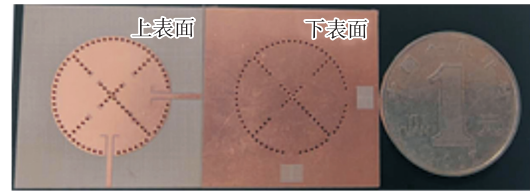
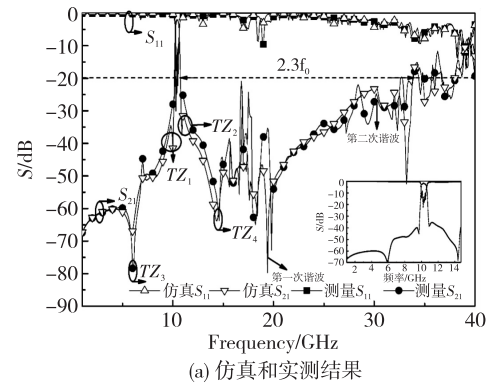


图7 高带外抑制宽阻带4阶交叉耦合SIW滤波器的仿真、实测数据及实物图

表2为本文滤波器与国内外相关滤波器的性能比较。由表可见,设计的滤波器具有损耗低、频率选择性高、宽阻带以及高阶谐波抑制的优点。表中, λ_g 为谐振腔波长,IL为插入损耗, TZ_s 为传输零点。

带外抑制水平优于35 dB,滤波器具有较好的带外抑制效果。本文设计的滤波器可应用于微波集成电路。

参考文献:

- [1] MARTIN T, GHIOTTO A, VUONG T H, et al. Compact quasi-elliptic and highly selective AFSIW filter with multilayer cross-coupling [J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2019, 6:

- 2-7.
- [2] LEE B, LEE G, LEE J. Two-layered cross-coupled post-loaded SIW filter with microstrip ports[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems, II. Express Briefs*, 2023, 4. 70(4):1346-1350.
- [3] ZHU F, HONG W, CHEN J X, et al. Cross-coupled substrate integrated waveguide filters with improved stopband performance [J]. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 2012, 22(12):633-635.
- [4] GU Lin, DONG Yuandan. Circular patch resonator loaded compact SIW filter with harmonic suppression [J]. *IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, 2022, 8:12-15.
- [5] ZHU Yilong, DONG Yuandan. Stripline resonator loaded compact SIW filters with wide suppression and flexible response [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 5. 30(5):465-468.
- [6] BOUTEJDAR A, BENNANI S D. Improvement of low pass and band pass filter characteristics using Cross-DGS-resonators, logarithmic series and coupling matrix methods[C]//Fez, Morocco: 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), 2017, 4:19-20.
- [7] EL-HALABI H, abou-chahine S, KADDOUR D, et al. DGS-SMS compact fifth order low pass filter[C]//Genoa, Italy: 2017 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS), 2017, 7:17-21.
- [8] WEN Zhenglin, HAN Yunan, Sun Xiaoyu, et al. Design of miniaturized low-pass filter with improved Koch fractal DGS[C]//Beijing: 2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing), 2017, 8:28-31.
- [9] POZAR D M. *Microwave Engineering*[M]. 3rd. ed. New York, USA: Wiley, 2004:115-116.
- [10] HONG J S, LANCASTER M J. *Microstrip filters for RF/microwave applications* [M]. New York, NY, USA: Wiley, 2001.
-
- (上接第 178 页)
- [12] 肖强,董加和,白涛,等. Cu/15°YX-LiNbO₃ SAW 谐振器的横向模抑制研究[J]. *压电与声光*, 2022, 44(2): 202-204.
- XIAO Qiang, DONG Jiahe, BAI Tao, et al. Research on transverse mode suppression of Cu/15°YX-LiNbO₃ SAW resonator [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2022, 44(2):202-204.
- [13] HASHIMOTO K, WU Z, WU T, et al. Revisiting piston mode design for radio frequency surface acoustic wave resonators [C]//Munich, Germany: 2022 IEEE MTT-S International Conference on Microwave Acoustics and Mechanics (IC-MAM). *IEEE*, 2022:60-63.
- [14] SOLAL M, GRATIER J, AIGNERR, et al. Transverse modes suppression and loss reduction for buried electrodes SAW devices [C]//San Diego, CA, USA: 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium. *IEEE*, 2010:624-628.