

基于复合左右手理论的双模态低损耗宽带毫米波片上传输线

沈光煦¹, 章晨扬¹, 冯文杰², 许 锋^{1*}, 车文荃²

(1. 南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏南京 210042; 2. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510641)

摘 要: 本文提出了一种基于复合左右手(Composite Right-/Left-Handed, CRLH)理论的双模态毫米波片上传输线(Transmission Line, TL), 有效兼顾了宽频段和低损耗特性, 并且同时包含支持前向波的右手频段和支持后向波的左手频段. 为解决毫米波半导体衬底高损耗、高寄生干扰的问题, 本文首先提出 T 型片上 CRLH 单元, 通过研究 CRLH 传输线的电路拓扑与结构实现, 减小了传输损耗并展宽带宽. 此外, 文章通过研究色散特性实现左手和右手通带两种模式. 基于砷化镓(GaAs)基集成无源器件(Integrated Passive Device, IPD)工艺, 加工并实测了一款工作频段覆盖 18~44.5 GHz 的 3 阶周期 CRLH TL. 本文提出的传输线尺寸紧凑, 为 1.3 mm × 0.55 mm, 带有 GSG(Ground Signal Ground)焊盘, 最小插入损耗为 1.18 dB, 3 dB 相对带宽超过 90%. 该测试结果表明所提出的片上传输线可广泛应用于实现独特电磁相位特性的片上功能电路和系统.

关键词: 射频电路; 毫米波; 片上电路; 传输线; 超材料

基金项目: 国家自然科学基金(No.62001244, No.62231014, No.61931009); 江苏省自然科学基金(No.BK20200742)

中图分类号: TN61; TN811

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)08-2641-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230511

Millimeter-Wave On-Chip Dual-Mode Transmission Line with Low Insertion Loss and Wide Band Based on Composite Right-/ Left-Handed Theory

SHEN Guang-xu¹, ZHANG Chen-yang¹, FENG Wen-jie², XU Feng^{1*}, CHE Wen-quan²

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: This article proposes a dual-mode millimeter-wave on-chip transmission line (TL) based on the composite right-/left-handed (CRLH) theory, featuring both wide bandwidth and low loss. In addition, both the right-handed (RH) band supporting the forward waves and the left-handed (LH) band supporting backward waves are realized. To address the issues of high loss and high parasitic effect in millimeter-wave range and on semi-conductor substrate, a T-type CRLH on-chip unit cell is proposed. To further reduce the transmission loss and extend the bandwidth, the circuit topology and structural realization are investigated. In addition, dual modes including the RH and LH bands are realized by analyzing the dispersion curve of the CRLH transmission line. Based on Gallium Arsenide (GaAs)-based integrated passive device (IPD) technology, a 3rd-order periodic CRLH TL ranging from 18~44.5 GHz was fabricated and measured. The proposed transmission line features a compact size of 1.3 mm × 0.55 mm including GSG (Ground Signal Ground) pads, a minimum insertion loss of 1.18 dB, and a 3 dB fractional bandwidth exceeding 90%. These measurement results demonstrate that the proposed on-chip transmission line can be widely applied in on-chip functional circuits and systems for unique electromagnetic phase characteristics.

Key words: radio-frequency circuits; millimeter-wave; on-chip circuits; transmission line; metamaterial

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62001244, No.62231014, No.61931009); Natural Science Foundation of Jiangsu Province for Youth (No.BK20200742)

1 引言

传输线是射频电路中最基本的元器件之一,承担着信号传输与器件互连的作用,并且广泛应用于天线、功率分配器、移相器^[1-3]等无源器件与系统.随着毫米波通信技术的快速发展,高频率与高集成度已成为射频集成电路的显著特征,此时,实现高传输效率、低损耗的宽带互连成为研究热点.1968年,Veselago^[4]提出了具有双负本构参数的“左手”媒质概念,不同于现有的“右手”媒质,双负特质为其带来了许多独特的电学特性,包括逆多普勒效应、逆切伦科夫效应、逆折射率等.2000年,Smith团队^[5]基于开口环谐振器和细直导线的周期电路实现了双负特性,并通过提取等效介电常数和等效磁导率验证了负折射率.2003年,Caloz和Itoh^[6]提出了一种基于左手型(Left-Handed, LH)传输线的微带实现方法,并基于左手传输线的寄生效应提出复合左右手传输线的概念.考虑到复合左右手(Composite Right-/Left-Handed, CRLH)传输线不仅支持传统的前向波传播模式,同时也存在后向波传播的左手模式^[7],由于片上CRLH传输线具有易集成及低损耗的特点,因此对于实现各类新型片上电路极具潜力^[8-11].

文献[12]报道了一种基于Si工艺的多层固态CRLH超材料传输线,其由金属平板电容器和螺旋电感器构成.文献[13]提出了一种新型的可切换的CRLH传输线(S-CRLH TL),使用开关代替可变电容器,实现左手和右手模式的切换.文献[14]和文献[15]报道了两款基于CRLH传输线的移相器,其中文献[14]基于左手和右手通带相移不同的特点,通过开关切换实现移相功能,工作频率为4~16 GHz,传输损耗至少5.2 dB;文献[15]则通过增加阶数实现不同度数的固定移相,带宽为15.5~19.5 GHz,传输损耗为1.3 dB.文献[16]基于硅基工艺提出一款10.5~13.5 GHz的弱耦合器,由于使用了折叠高阻抗线以减小尺寸,其传输损耗大于5 dB.文献[17]基于IPD工艺提出一款分支线耦合器,通过利用3种不同特性阻抗的CRLH传输线,实现了左手和右手频段的双频耦合.此外,文献[18]还报道了基于CRLH传输线的片上漏波天线,频段为37~41 GHz.文献[19]研究了基于CMOS工艺的52~67 GHz的CRLH传输线,同时实现了滤波特性.文献[20]研究了对偶复合左右手(D-CRLH)单元的响应特性,并成功实现了显著的小型化和出色的滤波性能.文献[21]提出了一种片上威尔金森功分器,基于CRLH传输线实现双频功能,该功分器具有较好的输入匹配和低插入损耗特性.综上所述,基于左手和右手特性,片上CRLH传输线可以实现移相、滤波、耦合、辐射等功能,但是依旧未解决高损耗、带宽有限的瓶颈问题,因此亟需从电路拓扑、结构设计等角度开展毫米波CRLH传输线的宽频带和

低损耗特性研究.

本文基于复合左右手理论提出了具有宽频段和低损耗特性的毫米波片上传输线,同时具备两种工作模式,即实现了具有后向波传输特性的左手频段和前向波传输特性的右手频段.为实现宽频带和低损耗,提出T型片上CRLH单元,并研究多阶CRLH传输线电路拓扑和结构实现.基于散射参数,计算了传播常数并提取了色散曲线.为了进行实验验证,基于集成无源器件(Integrated Passive Device, IPD)工艺设计和制造一款18~46 GHz的三阶片上CRLH传输线.在LH和RH频段内,实现了低于10 dB的低反射率,通带内最小插入损耗为1.18 dB.基于本文提出的CRLH片上传输线,可以进一步应用于设计具有左右手特性的滤波器、耦合器、功分器等电路与模块.

2 新型片上CRLH传输线设计

2.1 T型片上CRLH单元

图1给出了基于T型单元的多级复合左右手传输线电路拓扑.根据复合左右手传输线理论^[12],一个传统的CRLH单元由4个元件组成,包括:串联左手电容 C_L 和右手电感 L_R 、并联的左手电感 L_L 和右手电容 C_R .LH阻抗定义为 Z_L ,RH阻抗定义为 Z_R .传输线的特性阻抗为 Z_c .不同于传统CRLH单元的L型拓扑,为了减小螺旋线电感的外径,本文提出的片上CRLH单元采用T型拓扑.如图1所示,T型拓扑具有结构对称的特性,可以有效避免拓扑不对称导致的散射参数高频恶化的现象,因此采用T型CRLH单元可以有效实现级联.为实现最佳匹配,CRLH传输线需要设置为平衡状态^[7],即左手(Z_L)和右手(Z_R)阻抗相等,此时可得:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_R C_L L_L C_R}} \quad (1)$$

$$Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} = Z_R = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} = Z_c \quad (2)$$

定义 ω_1 和 ω_2 为工作频段两端的截止频率:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}} \left| 1 - \sqrt{1 + \frac{\sqrt{L_R C_R}}{\sqrt{L_L C_L}}} \right| \quad (3)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\sqrt{L_R C_R}}{\sqrt{L_L C_L}}} \right) \quad (4)$$

根据式(2),当 $L_R \times C_L = L_L \times C_R$ 时,CRLH传输线处于平衡状态,此时左手区间和右手区间的传播阻带将消失,从而形成一个较宽的频带.工作在左手频段的传输线支持反向平行的相速度和群速度.

为了验证这一独特特性,可进一步根据CRLH单元的传输矩阵提取传播常数,利用S参数建立联系进行色

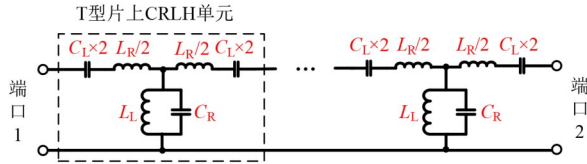


图1 基于T型单元的多级复合左右手传输线电路拓扑

散提取. 图2为CRLH单元电路结构提取的色散曲线, 其中, $L_R=0.5$ nH、 $C_R=201$ fF、 $L_L=0.16$ nH、 $C_L=64$ fF. 提取公式如下:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & Z_1/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_1/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1+Z_1Y_1/2 & 1+(Z_1+Z_1^2Y_1)/2 \\ Y_1 & 1+Z_1Y_1/2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

分立阻抗和导纳可以用 $Z_i=j\omega L_R+1/(j\omega C_L)$ 以及 $Y_i=j\omega C_R+1/(j\omega L_L)$ 进行计算. 因此, 可以得到传播常数的色散关系, 即

$$\begin{bmatrix} A-e^{\gamma p} & B \\ C & D-e^{\gamma p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$AD-(A+D)e^{\gamma p}+e^{2\gamma p}-BC=0 \quad (7)$$

$$\cosh(\gamma p)=(A+D)/2 \quad (8)$$

相位常数 β 作为 γ 的虚部可由式(9)提取:

$$\begin{aligned} \beta p &= \text{imag} \left(\text{acosh} \left(\frac{A+D}{2} \right) \right) \\ &= \text{imag} \left(\text{acosh} \left(\frac{1-S_{11}S_{22}+S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \right) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

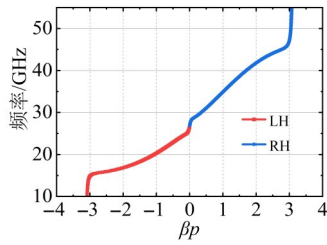


图2 CRLH单元的色散关系曲线

2.2 宽带低损耗片上CRLH传输线的结构实现

图3展示了复合左右手传输线的两种版图设计: 螺旋电感与传输线电感混合实现(版图A)、全螺旋电感实现(版图B). 螺旋电感器 L_R , 内径用 d_{in} 表示, 包括线之

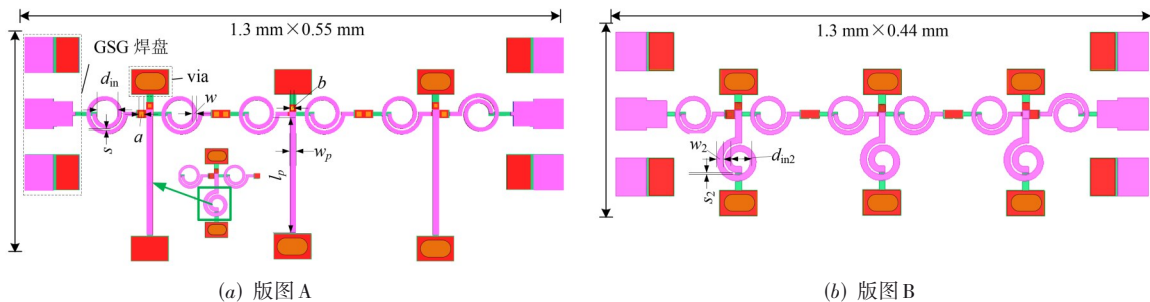


图3 不同实现方式的多阶CRLH传输线的版图

间的间距为 s 、线宽为 w . 正方形 MIM 电容器 C_L 的尺寸为 $a \times a$, 而 C_R 的尺寸为 $b \times b$. L_L 的长度和宽度分别表示为 l_p 和 w_p . 其中, 对于版图 A, $d_{in}=47.1$ μm 、 $s=4$ μm 、 $w=10$ μm 、 $a=12.35$ μm 、 $b=11.8$ μm 、 $l_p=330$ μm 、 $w_p=15$ μm ; 对于版图 B, 并联部分的左手电感用另一个螺旋电感代替, $d_{in2}=39$ μm 、 $s_2=4$ μm 、 $w_2=15$ μm , 通孔的尺寸均为 92 $\mu\text{m} \times 62$ μm .

图4(a)为两个结构的仿真响应曲线. 相比于混合实现的方案, 尽管使用全螺旋电感的版图尺寸减小了20%, 但是通带内插损增加约1 dB且带宽变窄, 因此采用混合形式实现电感可以有效兼顾小尺寸和低插损, 即串联电感采用螺旋电感实现, 而并联电感采用传输线电感实现. 根据式(1)、式(3)和式(4), 可以进一步得到该平衡式CRLH传输线的相对带宽公式, 一般为

$$\text{FBW} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = 2 \frac{\sqrt{L_L C_L}}{\sqrt{L_R C_R}} \quad (10)$$

因此, 提高左手电容与右手电容比值(或者左手电感和右手电感比值), 即 L_L/L_R 或 C_L/C_R , 可以有效展开多阶CRLH传输线的工作带宽. 如图4(b)所示, 当比值减小时, 传输线的带宽变窄; 当比值增大时, 传输线的带宽变宽. 图4(c)进一步研究了CRLH传输线阶数对于电路性能的影响. 对比二阶、三阶、四阶传输线, 随着阶数增加, 带内回波损耗曲线愈加平滑, 但是损耗增加且带宽变窄. 因此, 采取对称的三阶级联拓扑, 将并联的较小感值 L_L 使用更高 Q 值的传输线电感实现, 可以有效保证宽频带低损耗传输.

3 实验验证与在片测试

为了进行实验验证, 假设目标CRLH传输线的中心频率(f_0)为28 GHz, 下截止频率(f_1)为14 GHz, 上截止频率(f_2)为46 GHz. 通过使用式(1)~(4), 可以计算出单元电路的4个元件值: $L_R=0.55$ nH、 $L_L=0.147$ nH、 $C_R=220$ fF、 $C_L=59$ fF. 根据电感电容的经验公式^[22], 可以进一步得到集总的螺旋电感、传输线电感和MIM电容的版图尺寸. 图5展示了本文采用的砷化镓基的IPD工艺, 包含一个具有高电阻率的GaAs衬底, 其高度为100 μm , 此外包含3层金属层, 为降低趋肤效应引入的导体损耗, 本

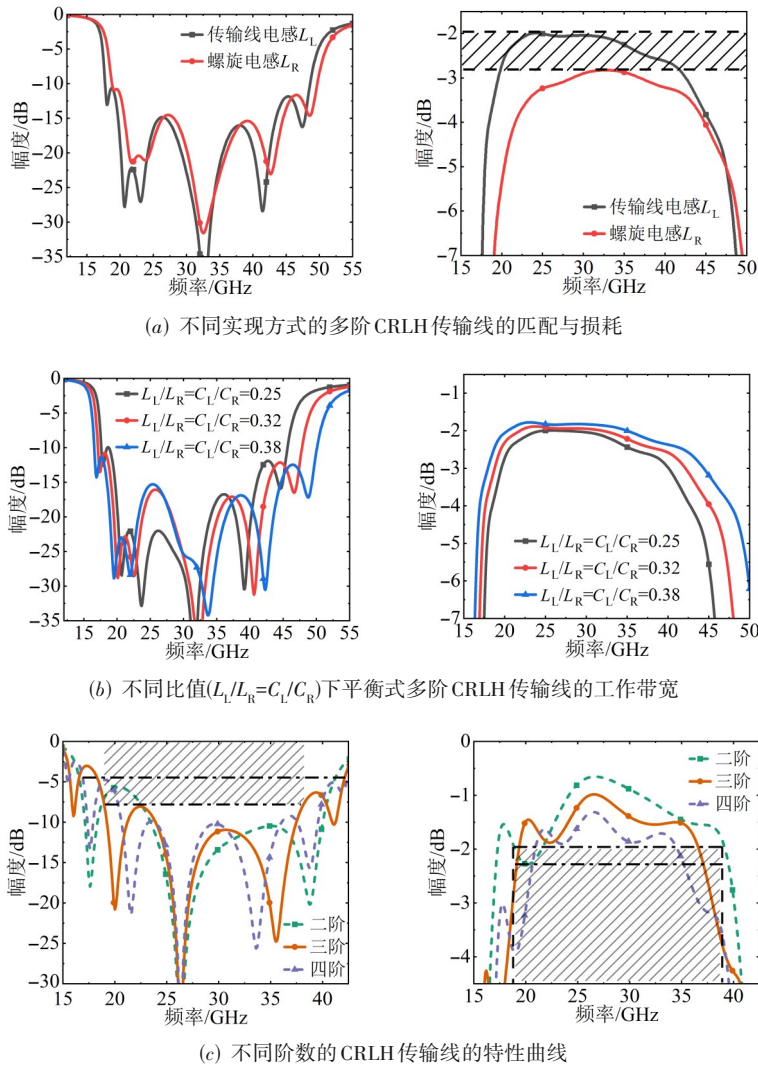


图4 不同实现方式的多阶CRLH传输线的频率响应

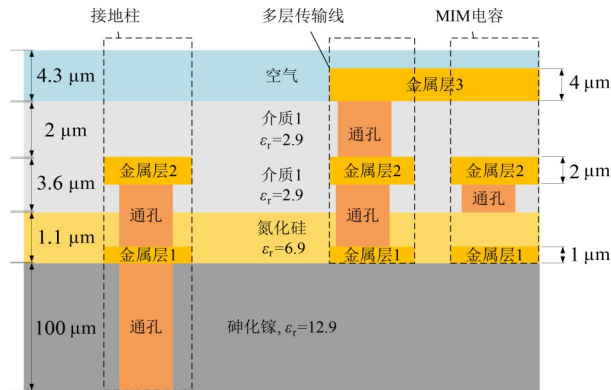


图5 所提出片上传输线的工艺参数

文大部分电路结构采用了三层金属合并的方式实现。

为实现 14~46 GHz 的片上传输线,所提出结构的版图模型如图3版图A所示,版图尺寸(带GSG焊盘)为 $1\,299\ \mu\text{m} \times 550\ \mu\text{m}$,包含3个相级联的CRLH单元

和6个接地柱 via. 每个单元包裹2个相同的螺旋电感 (L_R),2个相同的MIM电容 (C_L),共同组成传输线单元的串联部分.此外,并联部分包括一段传输线电感 (L_L)和MIM电容 (C_R).其中,通孔的尺寸为 $92\ \mu\text{m} \times 62\ \mu\text{m}$,传输线电感 $L_p=280\ \mu\text{m}$, $w_p=15\ \mu\text{m}$.

为进一步验证左右手两种传播模式,基于ADS的包络仿真工具对输入输出端口的载波信号进行相位仿真.通过在输入端口激励不同载波频率的高斯脉冲信号,测量传输线两端口信号的相位来区分波的前向与后向传播.

如图6所示,通过仿真左手或右手频率下载波信号在0.5 ns的相位差,可以看到,左手频段输出端信号相位超前,而右手频段输出端信号相位滞后于输出端.

如图7所示,使用罗德施瓦茨10 MHz~67 GHz矢量网络分析仪与TS150-THZ探针台实现实验测试.图8给出了该毫米波IPD传输线S参数的仿真与测试结果.可

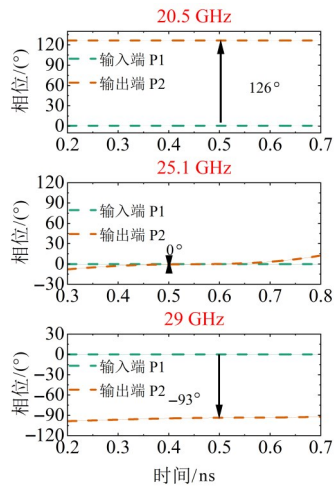


图6 所提出的CRLH片上传输线的包络仿真结果

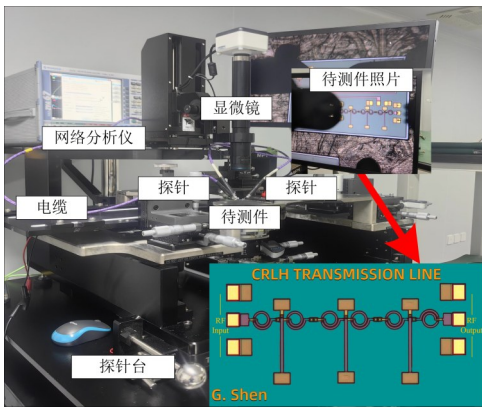


图7 所提出片上CRLH传输线的版图与实验平台

以看到,测试S参数与仿真结果大致吻合,微小的差别主要由螺旋电感和MIM电容的加工工艺误差导致.传输通带为18~44.5 GHz,可以看到清晰的5个传输极点,因此有效保证了宽频带内的高传输效率.本文所提出的复合左右手传输线在带内最小插损仅为1.18 dB,在31 GHz附近回波损耗低于30 dB,3 dB相对带宽(Fractional Band Width,FBW)超过90%,双边带滚降超过3.7 dB/GHz.

图9给出了所加工IPD三阶传输线的实测相移曲线,整个工作频段包含左手和右手两个频段,LH区间

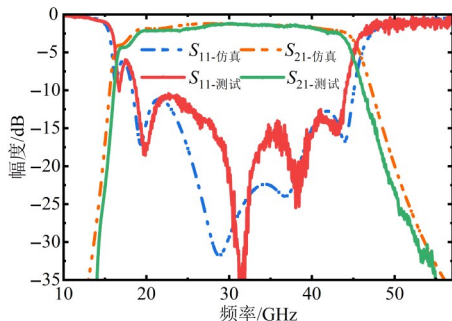


图8 所提出片上CRLH传输线的全波仿真和测试S参数结果

为19.5~25.2 GHz,RH区间为25.2~45.3 GHz.在25.2 GHz的过渡频率两信号相位保持一致.可以发现,两种传播模式的变化趋势与图6相印证.此外,展示的单元相移与结构总相移证实了传输线的总相移约为单元相移的3倍,S参数所提取的色散曲线与仿真几乎拟合,唯一的区别主要体现在零相移点从28 GHz频偏至25.2 GHz,差异的产生归因于测试与仿真散射参数的微小区别.

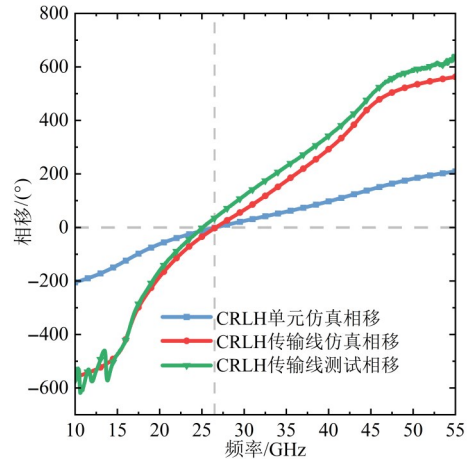


图9 所提出片上CRLH传输线的相移全波仿真曲线

如表1所示,CRLH片上传输线主要用于实现移相、耦合、天线以及滤波的功能,主要基于硅基MMIC、IPD以及CMOS工艺.和已发表的工作相比,本文提出的CRLH片上传输线具有更宽的工作带宽以及更低的通带插损,进一步证明了本文提出的基于T型低损耗宽带CRLH单元以及传输线的优势.

表1 与已发表的片上CRLH传输线的性能对比

工作对比	工艺	工作频带/GHz	插入损耗/dB	其他功能
文献[14]	Si MMIC	4~16	≥5.2	移相
文献[15]	Si MMIC	15.5~19.5	≥1.3	移相
文献[16]	Si MMIC	10.5~13.5	≥5	耦合器
文献[17]	Si IPD	1.4~1.65 2.3~2.7	≥4.3	耦合器
文献[18]	CMOS	37~41	—	漏波天线
文献[19]	CMOS	52~67	≥7	滤波
本文	GaAs IPD	18~44.5	≥1.18	滤波

4 结论

本文提出了一种基于GaAs衬底IPD工艺的双模态低损耗宽带毫米波片上传输线.针对毫米波半导体衬底高损耗、高寄生干扰的问题,提出T型片上CRLH单元,并研究多阶CRLH传输线低插损和带宽展宽技术.为分析并验证左右手色散特性,通过相位仿真分析传播模式,并基于测试参数研究传播常数提取方法.基于实测数据,所提出的IPD复合左右手传输线的最小插损

为 1.18 dB, 通带内回损低于 10 dB, 3 dB 相对带宽超过 90%。良好的性能进一步表明, 所提出的 IPD 毫米波片上传输线在射频集成电路中具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 徐鸿飞, 殷晓星, 孙忠良. 毫米波微带键合金丝互连模型的研究[J]. 电子学报, 2003, 31(S1): 2015-2017.
XU H F, YIN X X, SUN Z L. On the model of microstrip bonding wire interconnects for millimeter wave applications[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(S1): 2015-2017. (in Chinese)
- [2] 鲍迪, 林先其, 崔铁军. 基于 CRLH 结构的移相器和功率分器设计[J]. 电子学报, 2007, 35(S1): 104-107.
BAO D, LIN X Q, CUI T J. Design of phase shifters and power dividers based on a composite right/left handed structure[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(S1): 104-107. (in Chinese)
- [3] 赵晖, 崔铁军. 基片集成波导中的混合左右手结构及其应用[J]. 电子学报, 2007, 35(S1): 108-111.
ZHAO H, CUI T J. Composite right/left handed structure realized by substrate integrated waveguide and its applications[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(S1): 108-111. (in Chinese)
- [4] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [5] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [6] CALOZ C, ITOH T. Novel microwave devices and structures based on the transmission line approach of metamaterials[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Piscataway: IEEE, 2003: 195-198.
- [7] CALOZ C, ITOH T. Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications[M]. Hoboken: Wiley, 2005.
- [8] 马丽娜, 顾昌展, 周凌云, 等. 基于分形超表面的小型化宽带高透射率平面透镜天线[J]. 电子学报, 2022, 50(12): 3003-3013.
MA L N, GU C Z, ZHOU L Y, et al. A miniaturized broadband planar lens antenna with high transmittance based on fractal metasurface[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(12): 3003-3013. (in Chinese)
- [9] 王崧, 董元旦. 基于混合电磁超材料的宽角扫描相控阵天线[J]. 电子学报, 2023, 51(2): 267-274.
WANG Z, DONG Y D. A hybrid metamaterial-based wide-angle beam-scanning phased array antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(2): 267-274. (in Chinese)
- [10] 李晓鹏, 李庚禄, 张华福. 一种单层双频宽带 GNSS 测量型天线设计[J]. 电讯技术, 2015(2): 211-215.
LI X P, LI G L, ZHANG H F. Design of a monolayer dual-frequency broadband antenna with surveying for GNSS[J]. Telecommunication Engineering, 2015(2): 211-215. (in Chinese)
- [11] 李虹萍, 陈海东, 薛泉, 等. 多路任意功分比 Gysel 功率分器[J]. 电子学报, 2022, 50(2): 383-390.
LI H P, CHEN H D, XUE Q, et al. N-way Gysel power divider with arbitrary power dividing ratio[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 383-390. (in Chinese)
- [12] HU Z R, CURTIS P D, TONG W. A multilayer compact solid state composite right/left-handed metamaterial transmission line[J]. IEEE Electron Device Letters, 2008, 29(12): 1383-1385.
- [13] JANG T, HWANG S H, BANG Y S, et al. Switchable composite right/left-handed (S-CRLH) transmission line using MEMS switches[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(12): 804-806.
- [14] HANGAI M, KOMARU R, SHINJO S. Broadband MMIC phase shifters based on CRLH circuit[C]//2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Piscataway: IEEE, 2019: 1458-1460.
- [15] PERRUISSEAU-CARRIER J, SKRIVERVIK A K. Composite right/left-handed transmission line metamaterial phase shifters (MPS) in MMIC technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4): 1582-1589.
- [16] SIMION S, SAJIN G, MARCELLI R, et al. Design and fabrication of MMIC coupled lines coupler consisting of composite right/left-handed transmission lines[C]//EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool". Piscataway: IEEE, 2007: 2073-2077.
- [17] CHU H N, LI G Y, MA T G. Dual-mode coupler with branch-line/rat-race responses on integrated passive device process[C]//2019 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). Piscataway: IEEE, 2019: 82-84.
- [18] LIN C C, CHANG C C, HSIEH S C. Design of 40-GHz CRLH-TL chip antenna using 0.35- μm CMOS-MEMS technology[C]//2010 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). Piscataway: IEEE, 2010: 555-558.

- [19] ZHANG Y, FONG N H W, WONG N. Design of CRLH millimeter-wave passive filters in standard CMOS process [C]//2009 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). Piscataway: IEEE, 2009: 32-35.
- [20] SHEN G X, CHE W Q, FENG W J, et al. Analytical design of compact dual-band filters using dual composite right-/left-handed resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(3): 804-814.
- [21] CHU H N, JIANG M J, MA T G. On-chip dual-band millimeter-wave power divider using GaAs-based IPD process[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(2): 173-176.
- [22] BAHL I. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits[M]. Boston: Artech House, 2003.

作者简介

沈光煦 男,1991年生,江苏盐城人.博士,南京邮电大学讲师,硕士生导师.主要研究方向为微波电路、毫米波集成电路、无源滤波器、射频开关.中国电子学会会员编号:E190025026M.

E-mail: shen_guangxu@163.com

章晨扬 男,1998年生,江苏泰州人.目前就读于南京邮电大学.主要研究方向为无源集成电路.

E-mail: absrtrus_brique@163.com

冯文杰 男,1985年生,河南商丘人.博士,华南理工大学教授,博士生导师.主要研究方向为微波毫米波电路与器件、电路封装技术等.中国电子学会会员编号:E190013916S.

E-mail: fengwenjie1985@163.com

许锋 男,1963年生.南京邮电大学教授,博士生导师,IEEE学会高级会员.主要研究方向为毫米波电路、器件与天线,混合集成平面电路研究与开发;周期结构新电磁材料开发,计算电磁学;电磁干涉与电磁兼容.

E-mail: feng.xu@njupt.edu.cn

车文荃 女,1968年生,四川邻水人.中国电子学会会士,IEEE Fellow,华南理工大学教授,博士生导师.主要研究方向为电磁理论与计算电磁学、射频集成电路与天线、微波技术在医学上的应用.中国电子学会会员编号:E190016057F.

E-mail: eewqche@scut.edu.cn