

文章编号: 2095-4980(2019)03-0353-06

一种 D 波段小型化定向耦合器芯片设计

罗显虎^{a,b}, 程 序^{a,b}, 张 亮^{a,b}, 韩江安^{a,b}, 陈凤军^{a,b}, 夏鑫淋^{a,b}, 邓贤进^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 基于 GaAs 0.1 μm pHEMT 工艺, 设计了一款工作在 0.1~0.14 THz 的小型化定向耦合器芯片。采用加载开路枝节线的方式提高传输线的等效电长度, 进而实现电路结构的小型化; 利用曲折线的方式构成开路枝节线, 使得耦合器的物理尺寸进一步缩小。采用电磁仿真软件仿真表明, 所设计的小型化定向耦合芯片中心工作频率为 0.12 THz, 相对带宽大于 30%, 带内的回波损耗高于 20 dB, 带内插入损耗小于 1 dB, 耦合度为 (10 ± 0.5) dB, 带内隔离度大于 20 dB, 直通端口与耦合端口相位差为 $90^\circ \pm 3.5^\circ$, 其尺寸为 $0.21 \text{ mm} \times 0.19 \text{ mm}$ (不计 Pad 尺寸)。

关键词: 砷化镓; 小型化; 定向耦合器; 开路枝节; 曲折线

中图分类号: TN622

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201903.0353

Design of on-chip D band miniaturized directional coupler

LUO Xianhu^{a,b}, CHENG Xu^{a,b}, ZHANG Liang^{a,b}, HAN Jiang'an^{a,b}, CHEN Fengjun^{a,b}, XIA Xinlin^{a,b}, DENG Xianjin^{a,b}

(a. Microsystem & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China;

b. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Based on the 0.1 μm GaAs HEMT process, a miniature directional coupler chip operating in 0.1–0.14 THz is designed. The equivalent electric length of the transmission line is increased by loading the open branch to miniaturize circuit structure. The physical size of the coupler is further reduced by using the zigzag line, which is realized by the open branch and node line. Simulation results show that the designed miniaturized directional coupling chip has a center operating frequency of 0.13 THz, a relative bandwidth of more than 30%, an in-band echo loss of more than 20 dB, an in-band insertion loss of less than 1 dB, a coupling degree of (10 ± 0.5) dB, a phase difference of $(90^\circ \pm 3.5^\circ)$, and a size of $0.21 \text{ mm} \times 0.19 \text{ mm}$ (without pad).

Keywords: GaAs; miniaturization; directional coupler; open branch; zigzag line

随着无线通信、雷达等电子系统的发展, 频谱资源越来越紧张。太赫兹频段作为目前尚未完全被人类开发的频谱资源, 其具备的良好电特性使得该频段的电子系统具有极好的应用前景。定向耦合器作为使用最多的电子器件之一, 广泛用于无线通信系统电子电路的设计中, 如功率计、功放、混频器等电路^[1-8]。

耦合器芯片的设计主要考虑耦合器的尺寸、方向性、耦合度以及回波损耗等指标的折中, 文献[9]利用曲折线使得耦合器的尺寸大幅减小, 实现了一款高性能的耦合器, 但其未对主传输线处理, 因此还有进一步缩小尺寸的空间; 文献[10]采用集总元件实现了一款小型化的耦合器, 但其工作频段较低, 不足以运用到 D 波段的耦合器设计中; 文献[11]中采用分型技术实现电流的曲折分布, 进而实现了耦合器的小型化设计, 但其制作工艺复杂, 不太适用于芯片设计; 文献[12]采用周期结构的人工电磁材料减小奇偶模的相速, 进而实现耦合器的小型化设计; 文献[6]采用耳蜗式多路实现耦合器的小型化设计, 但其采用的集总元器件工作频率低, 该方法难以在太赫兹波段实现小型化耦合器的设计。

基于上述研究方法, 本文提出一种由曲折线构成的开路枝节线加载的新型小型化耦合器。首先仿真分析加载开路曲折线对主传输线电长度的影响, 然后将分析得到的结论运用到耦合器的设计中, 最后得到一款工作在 0.1~0.14 THz 的 10 dB 定向耦合器, 该耦合器性能良好, 其尺寸约为常规结构尺寸的 70%, 节约了芯片面积, 降低了成本。

1 传输线小型化分析

1.1 T 型加载理论分析

文献[3]将电长度为 1/4 波长的传输线进行 T 型加载传输线等效, 如图 1 所示, 等效的 T 型加载传输线与原主传输线电特性一致的条件为两传输矩阵最简表达式应该一致, 由此得出以下关系:

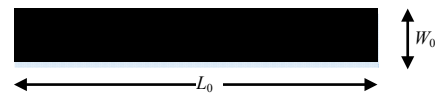
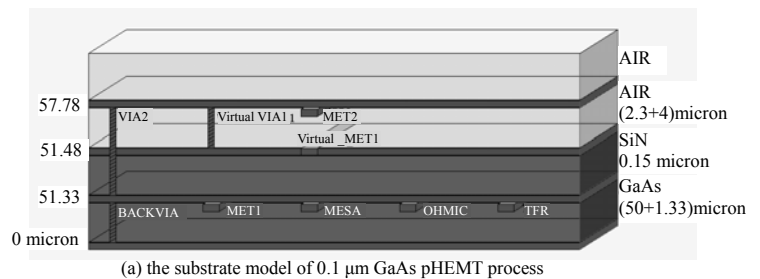
$$\tan \theta_1 \tan \theta_2 = \frac{N}{M^2} \tag{1}$$

$$\tan \theta_2 = \frac{M^2 - N^2}{KN} \tan \theta_3 \tag{2}$$

式中: $K = Z_1 / Z_2$; $M = Z_1 / Z_0$; $N = Z_1 / Z_3$ 。当 T 型传输线满足上述关系式后, 可使其电长度等效为 90° , 即与 1/4 波长传输线等效。本文主要通过合理优化设计 T 型枝节来实现对耦合器的小型化设计。

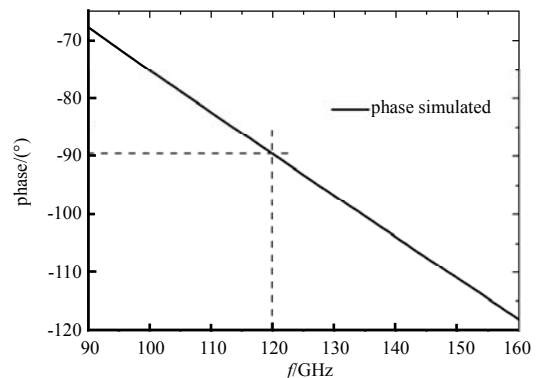
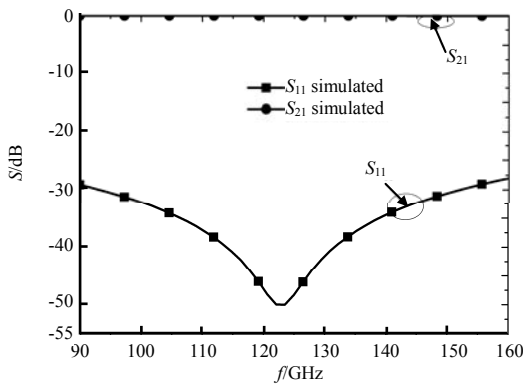
1.2 传输线枝节加载仿真分析

将上文提及的 1/4 波长传输线在 $0.1 \mu\text{m}$ GaAs pHEMT 工艺中建模, 如图 2(a)所示。在 $0.1 \mu\text{m}$ 的 pHEMT 工艺基板模型中采用 MET2 金属层建立如图 2(b)所示的主传输线模型, 传输线的线宽为 W_0 , 线长为 L_0 。通过仿真计算得到, 当图 2(b)中的主传输线的特征阻抗为 50Ω , 电长度为 90° 时, 其仿真结果见图 3, 此时 $W_0=24 \mu\text{m}, L_0=218 \mu\text{m}$ 。根据仿真结果可知, 该主传输线的插入损耗小于 0.5 dB , 带内回波损耗大于 30 dB , 在中心频率 0.12 THz 处的电长度为 89.4° 。为进一步缩小传输线的长度, 选择 T 型加载方式,



(a) the substrate model of $0.1 \mu\text{m}$ GaAs pHEMT process
(b) main transmission line model
Fig.2 Transmission line model
图 2 传输线模型

设计出如图 4(a)所示的 T 型传输线, 通过在主传输线中心加载一个长度为 L_2 , 宽度为 W_2 的传输线来实现传输线的小型化, 主传输线的宽度为 W_1 , 长度为 L_1 。为使 T 型传输线与图 2 中主传输线的电特性等效, 通过仿真分析得到如图 5 所示的仿真结果。根据图 5 所示结果, 该传输线在带内的插入损耗在 1 dB 以内, 带内回波损耗大于 22 dB , 工作在 0.12 THz 处的传输线电长度为 89.6° , 此时传输线的 $W_1=24 \mu\text{m}, L_1=200 \mu\text{m}, W_2=14 \mu\text{m}, L_2=60 \mu\text{m}$ 。为进一步缩小传输线的长度, 可以通过多枝节加载方式来实现, 具体如图 4(b)所示。加载 3 个开路枝节于主传输线上, 其中 2 路为对称倒 L 型结构, 倒 L 结构的开路线宽度为 W_3 , 长度由 L_3, L_4, L_5 构成; 加载枝节线的另外一路长度为 L_2 , 宽度为 W_2 。通过调试设计各个开路枝节线的长度, 最后得到如图 6 所示的多枝节加载传输线的频率响应曲线。此时传输线带内插入损耗小于 1 dB , 回波损耗大于 14 dB , 工作在 0.12 THz 的传输线的电长度为 89.5° ; 传输线的 $W_1=24 \mu\text{m}, L_1=160 \mu\text{m}, W_2=14 \mu\text{m}, L_2=60 \mu\text{m}, W_3=10 \mu\text{m}, L_3=54.2 \mu\text{m}, L_4=41.5 \mu\text{m}, L_5=48.5 \mu\text{m}$ 。



(a) S parameter simulation
(b) phase simulation
Fig.3 Simulation results of the quarter wavelength main transmission line
图 3 1/4 波长主传输线仿真结果图

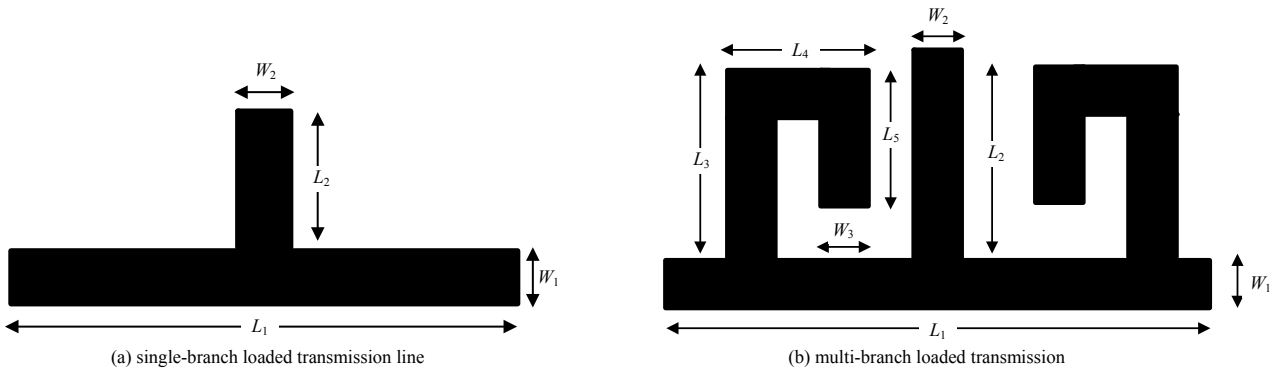


Fig.4 Structural chart of branches loaded on main transmission line

图 4 枝节加载于主传输线结构图

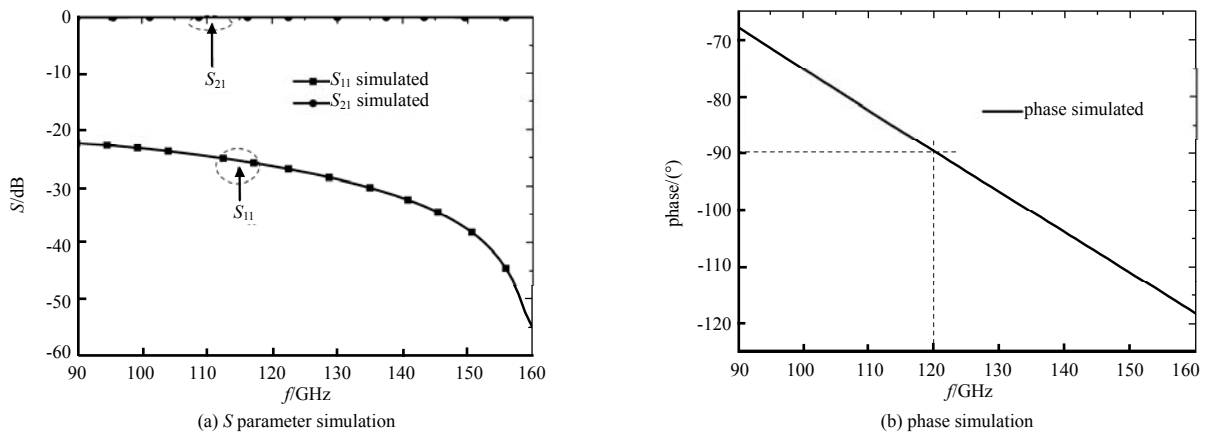


Fig.5 Simulation results of single-branch loaded main transmission line

图 5 单枝节加载主传输线仿真结果图

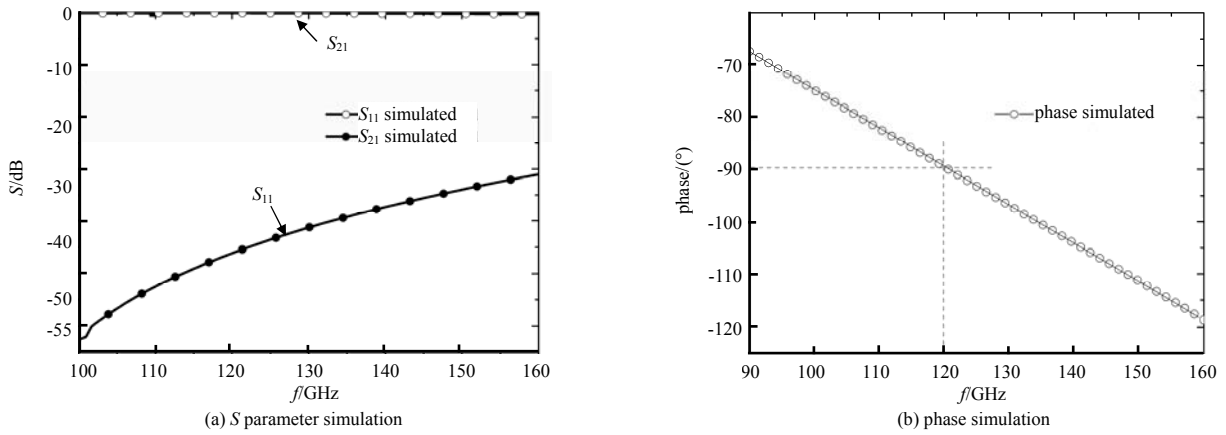


Fig.6 Simulation results of multi-branch loaded main transmission lines

图 6 多枝节加载主传输线仿真结果图

如表 1 所示，通过对比常规微带传输线、单枝节加载传输线、多枝节加载传输线可知：通过加载枝节的确能缩小传输线尺寸，本文设计的多枝节加载传输线尺寸约为常规微带主传输线尺寸的 70%，为太赫兹无源器件特别是定向耦合器的小型化设计做了一定的基础研究。

表 1 三种传输线长度对比

Table1 Comparison of three transmission line lengths

	conventional micro-strip transmission line	single-branch loaded transmission line	multi-branch loaded transmission line
electric length@0.12 THz/(°)	89.4	89.6	89.5
width/ μm	24	24	24
length/ μm	218	200	160
ratio/%	100	91.4	73

2 小型化定向耦合器设计

基于上文提及的方法，将小型化传输线运用到定向耦合器设计中，本文设计的定向耦合器如图 7 所示，太赫兹信号通过 port1 进入耦合器、port2 直通输出、port3 耦合输出、port4 为隔离端。为实现小型化设计，耦合器的设计采用 3 个开路枝节加载的方式实现。仿真研究发现，通过调试加载线线长、线宽可以实现对耦合器的工作频率、传输相位的调节；调节上下传输线间距 gap1，可以实现对耦合度的调节。传统加强耦合度的方法大多在传输线上加载锯齿状的结构，但锯齿状对加工容差要求较高，本文将主传输线设计成凹凸结构，有利于加强耦合，降低加工要求，提高容差。

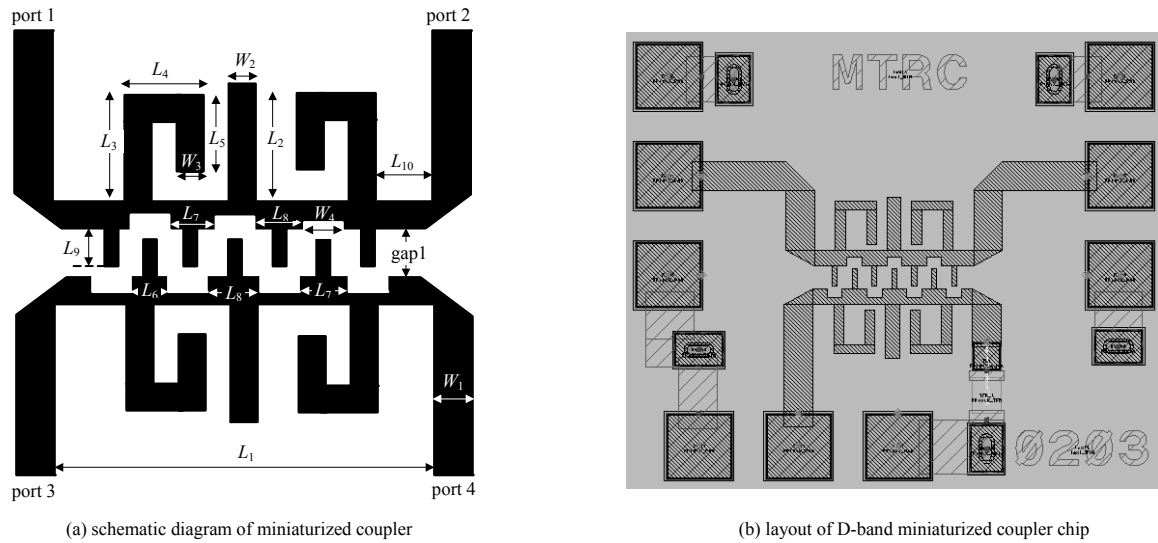


Fig.7 Structural diagram of the on-chip directional coupler
图 7 定向耦合器结构图

经过调试，最终得到如图 8 所示的 S 参数响应曲线，图 9 所示的相位传输函数响应曲线。由图 8 可知，该定向耦合器工作在 0.11~0.14 THz，带内插入损耗小于 1 dB，带内回波损耗大于 20 dB，耦合度为(10±0.5) dB，带内隔离度大于 20 dB。直通端口与耦合端口相位差如图 9 所示，其差值为 90°±3.5°，耦合器不带 Pad 尺寸为 0.21 mm×0.19 mm。

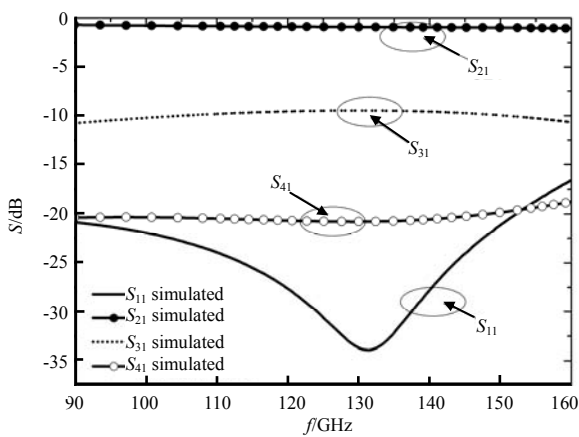


Fig.8 Simulation results of S-parameters of D-band miniaturized coupler
图 8 D 波段小型化耦合器 S 参数仿真结果图

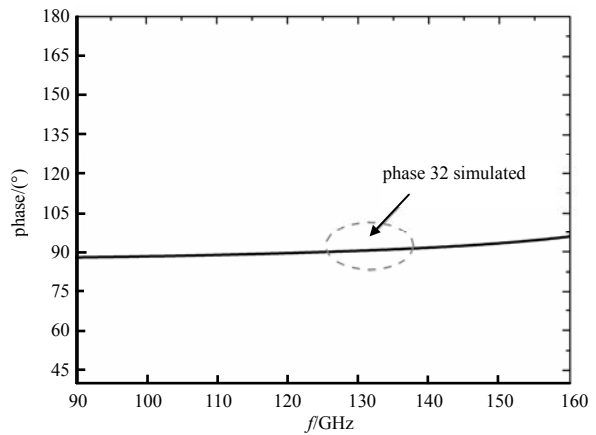


Fig.9 Phase simulated of the D-band miniaturized coupler
图 9 D 波段小型化耦合器相位仿真结果图

此时图 7 所示的耦合器的尺寸 $W_1=24 \mu\text{m}$, $L_1=160 \mu\text{m}$, $W_2=14 \mu\text{m}$, $L_2=60 \mu\text{m}$, $W_3=10 \mu\text{m}$, $L_3=54.2 \mu\text{m}$, $L_4=41.5 \mu\text{m}$, $L_5=48.5 \mu\text{m}$, $L_6=25 \mu\text{m}$, $L_7=26 \mu\text{m}$, $L_8=26 \mu\text{m}$, $L_9=20 \mu\text{m}$, $L_{10}=20.8 \mu\text{m}$, $\text{gap}_1=23 \mu\text{m}$ 。

3 结论

本文采用加载开路枝节线的方式提高传输线的等效电长度进而实现电路结构的小型化,同时利用曲折线的方式构成开路枝节线,使得耦合器的物理尺寸进一步缩小。采用电磁仿真软件仿真表明,所设计的小型化定向耦合器芯片中心工作频率为 0.12 THz,相对带宽大于 30%,带内的回波损耗高于 20 dB,带内插入损耗小于 1 dB,耦合度为 (10 ± 0.5) dB,带内隔离度大于 20 dB,直通端口与耦合端口相位差为 $90^\circ\pm 3.5^\circ$,该耦合器在功率计、检波器、混频器等电路设计中有着良好的应用前景^[7-8,13-15]。

参考文献:

- [1] LI E S, KANG C J. Properties of multisection transdirectional coupled-line couplers[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, 12(7): 1166–1174.
- [2] LIAO Z H, ZHANG X C, YANG X. A novel frequency-tunable branch line coupler[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2018, 28(1): e21154.
- [3] YOON H J, MIN B W. Two section wideband 90° hybrid coupler using parallel-coupled three-line[J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2017, 27(6): 548–550.
- [4] 任健, 要志宏. S 波段 GaN MMIC Doherty 功率放大器[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018, 16(2): 363–367. (REN Jian, YAO Zhihong. Design of S-band GaN MMIC Doherty power amplifier[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018, 16(2): 363–367.)
- [5] 闫雪, 董烨, 张恒, 等. 一种新型的混合型双频高功率微波器件[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018, 16(1): 96–100. (YAN Xue, DONG Ye, ZHANG Heng, et al. A novel hybrid dual band high power microwave device[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018, 16(1): 96–100.)
- [6] 周劲波, 郭庆功. 耳蜗式多路耦合器的小型化设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2016, 14(3): 396–400. (ZHOU Jinbo, GUO Qinggong. Miniaturization design of cochlear-based channelizer[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016, 14(3): 396–400.)
- [7] 梅腾达, 张勇. 220 GHz 检波器的设计[J]. *微波学报*, 2014(s1): 546–548. (MEI Tengda, ZHANG Yong. Design of 220 GHz detector[J]. *Journal of Microwaves*, 2014(s1): 546–548.)
- [8] 林长星, 陆彬, 吴秋宇, 等. 基于混频偏置合成的高速太赫兹无线通信系统[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2017, 15(1): 1–6, 25. (LIN Changxing, LU Bin, WU Qiuyu, et al. A high speed terahertz wireless communication system based on mixer and bias power combination[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, 15(1): 1–6, 25.)
- [9] HOU D B, HONG W, GOH W L, et al. A D-band compact rat-race coupler using novel phase inverter in standard CMOS process[C]// 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012: 1–3.
- [10] HIROTA T, MINAKAWA A, MURAGUCHI M. Reduced-size branch-line and rat-race hybrids for uniplanar MMIC's[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 1990, 38(3): 270–275.
- [11] GHALI H, MOSELHY T A. Miniaturized fractal rat-race, branch-line, and coupled-line hybrids[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2004, 52(11): 2513–2520.
- [12] KAZANTSEVA E V, MAIMISTOV A I, OZHENKO S S. Solitary electromagnetic waves propagation in the asymmetric oppositely-directed coupler[J]. *Physical Review A*, 2009, 80(4): 82.
- [13] 张建军, 周静涛, 杨成樾, 等. 基于零偏置肖特基二极管的 270 GHz 高性能波导检波器[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(1): 1–5. (ZHANG Jianjun, ZHOU Jingtao, YANG Chengyue, et al. A 270 GHz high performance waveguide detector utilizing a zero-bias Schottky diode[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2015, 34(1): 1–5.)
- [14] 陈琦, 何晓阳, 张健, 等. 一种 0.3 THz 二维光子晶体定向耦合器的设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(4): 525–528. (CHEN Qi, HE Xiaoyang, ZHANG Jian, et al. Design of 0.3 THz 2D photonic crystal directional coupler[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(4): 525–528.)
- [15] 康小克, 陈鹏, 邓贤进, 等. 基于 3 dB 定向耦合器的 0.14 THz 功率分配器设计方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 2907–2911. (KANG Xiaoke, CHEN Peng, DENG Xianjin, et al. Design method about 0.14 THz power divider based on 3 dB directional coupler[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2907–2911.)

作者简介:



罗显虎(1990-), 男, 四川省安岳县人, 硕士、研究实习员, 主要研究方向为射频、毫米波、太赫兹集成电路与系统。email:luoxianhu@mtrc.ac.cn.

韩江安(1984-), 男, 广西省桂林市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为射频、毫米波、太赫兹集成电路与系统。

夏鑫淋(1992-), 男, 四川省邻水县人, 硕士、研究实习员, 主要研究方向为射频、毫米波、太赫兹集成电路与系统。

程序(1987-), 男, 四川省简阳市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为射频、毫米波、太赫兹集成电路与系统。

张亮(1989-), 男, 山西省长治市人, 硕士、助理研究员, 主要研究方向为射频、毫米波、太赫兹集成电路与系统。

陆凤军(1989-), 男, 重庆市人, 硕士、助理研究员, 主要研究方向为射频、毫米波、太赫兹集成电路与系统。

邓贤进(1973-), 男, 四川省安岳县人, 研究员, 主要研究方向为电磁场理论与仿真技术、集成电路技术、收发信道系统技术及通信系统技术。

中国电子学会电路与系统分会“第三十届学术年会” 暨“首届电路与系统周”征文通知

中国电子学会电路与系统分会“第三十届学术年会”暨“首届电路与系统周”将于2019年10月18~22日在北京大学召开。会议由中国电子学会电路与系统分会主办, 北京大学承办。首届电路与系统周会议主题包括电路与系统理论与技术、大规模集成电路设计与制造技术、神经网络、图论与系统优化、生物计算与生物信息处理、混沌与非线性电路等, 设置特邀报告、主题报告和专题报告。我们诚征电路与系统及相关领域最新研究进展的学术论文(中英文均可)。会议征文内容及投稿如下:

一、征文范围

会议征文方向主要包括(但不限于)以下主题:

1. 电路与系统理论与技术
2. 大规模集成电路设计与制造技术
3. 图论与系统优化
4. 生物计算与生物信息处理
5. 混沌与非线性电路
6. 传感器、无线传感网和物联网
7. 信号与信息处理系统

二、征文要求

1. 投稿须是未曾在国内外公开发表过的文章, 无弄虚作假, 无一稿多投, 不涉及国家秘密。
2. 投稿论文中英文均可。投稿首页请附作者信息页(包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键词、正文、参考文献)。中文论文请包括英文题目、作者、作者单位、摘要和关键词; 英文论文请附上中文题目、作者、作者单位、摘要和关键词。论文摘要应包括目的、方法、结果、结论四部分。
3. 会议论文格式请参照会议网站上的附件一《论文模板》。

三、论文提交

采用中科院国际会议服务平台 <http://cscas30.csp.escience.cn> 投稿。登录网站后请先注册, 后投稿。也可以将论文发送到邮箱 cscas@mail.ie.ac.cn, 注明电路与系统周论文投稿。

四、重要日期

论文投稿截止日期: 2019年8月31日
论文录用通知日期: 2019年9月20日
论文正稿提交日期: 2019年10月8日

更多详情请登录网站: <http://www.iaeej.com>