

基于间隙波导的毫米波宽带定向耦合器

沈瑞亮^{1,2}, 冯文杰^{1,2}, 倪啸宇^{1,2}, 王 慧^{1,2}, 施永荣³

(1. 华南理工大学广东省毫米波与太赫兹重点实验室, 广东广州 510640; 2. 南京理工大学通信工程系, 江苏南京 210094;
3. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 211106)

摘要: 本文基于新型间隙波导传输线技术, 设计了一种宽带的 0 dB 前向波定向耦合器, 提出的耦合器中心频率在 30 GHz, 可以实现宽带平坦的 0 dB 耦合特性, 通过在两个相邻的槽间隙波导的公共壁上开耦合缝隙来实现主通道到副通道的能量耦合. 为了方便实验测试, 还设计了宽带的槽间隙波导到标准 WR-28 波导的过渡转换结构. 最后进行了实物加工与测量, 根据测量结果, 本文提出的定向耦合器工作频带为 27.1~31.5 GHz, 带内最大插入损耗约为 0.5 dB, 且回波损耗小于 -10 dB, 耦合器的相对带宽为 14.7% (中心频率 30 GHz). 测量结果与仿真结果吻合较好, 实验验证了该设计方法的正确性.

关键词: 间隙波导; 定向耦合器; 电磁带隙; 低损耗; 宽带

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (No.2018B010115001); 国家自然科学基金 (No.61931009, No.61971387); 广东省珠江人才创新创业团队项目 (No.2017ZT07X032); 2019 创新研究基金 (No.GSZJB-DQD-2019)

中图分类号: TN928 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)08-2118-06

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

DOI: 10.12263/DZXB.20211201

Millimeter-Wave Broadband Directional Coupler Based on Gap Waveguide

SHEN Rui-liang^{1,2}, FENG Wen-jie^{1,2}, NI Xiao-yu^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, SHI Yong-rong³

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Millimeter-Wave and Terahertz, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

2. Department of Communication Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094 China;

3. Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China.)

Abstract: In this paper, a broadband 0 dB forward wave directional coupler is designed based on the new gap waveguide transmission line technology. The center frequency of the proposed coupler is 30 GHz, which can realize broadband flat 0 dB coupling level. The energy coupling from the main channel to the auxiliary channel is realized by multi coupling slots on the common wall of two adjacent groove gap waveguides. For the convenience of experimental measurement and verification, the transition from groove gap waveguide to standard WR-28 waveguide is designed. Finally, the designed coupler is manufactured and measured. According to the measurement results, the proposed directional coupler working frequency band is 27.1~31.5 GHz and maximum insertion loss is about 0.5 dB, the return loss is less than -10 dB, and relative bandwidth is about 14.7% (center frequency is 30 GHz). The simulated result and measurement result agree well with each other, and the correctness of the design method is verified by experiments.

Key words: gap waveguide; directional coupler; electromagnetic band gap; low loss; broadband

Foundation Item(s): Guangdong Province Key Field Research and Development Plan (No.2018B010115001); National Natural Science Foundation of China (No.61931009, No.61971387); Pearl River Talent Innovation and Entrepreneurship Team Project in Guangdong Province (No.2017ZT07X032); 2019 Innovation Research Fund (No.GSZJB-DQD-2019)

1 引言

现代无线通信系统正朝着高频和高数据传输速率的方向发展,以适应未来通信的应用.毫米波具有极宽的带宽、波束窄、可靠性高和方向性好等优点,是未来无源器件的主要应用频段.

定向耦合器是微波和毫米波系统中最重要无源器件之一,被广泛应用在平衡放大器、混频器以及阵列天线的馈电网络等微波电路中.特别是0 dB前向波定向耦合器,被广泛应用在测量以及信号源的隔离和屏蔽中,而且0 dB耦合器不能用后向波的耦合机制来实现.在毫米波频段,传统的一些传输线技术在性能、易集成性以及制造成本等方面有所缺陷.在微波毫米波器件设计中,最常用的平面传输线是微带线^[1,2]和带状线^[3],它们经常被选择是因为易与其他有源器件集成以及制造简单.但是随着工作频率的增加,它们的损耗会越来越大,而且封装的时候会存在腔体谐振等问题.空腔波导^[4]通常适合高频和低损耗的应用,但是它们很难和有源器件集成,而且对加工精细度要求很高,所以也有一定的局限性.因此,毫米波频段的应用就需要新的可替代传统传输线的技术来实现.近年来,基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)技术作为一种低损耗传输线被广泛应用在毫米波频段^[5-7].然而,在设计微波毫米波无源器件时,比如耦合器,会恶化SIW的低损耗特性,因为弯曲、开缝隙或者一些其他行为都会破坏SIW主模的特性.而且,在SIW中,电磁波是在介质中传播,所以当频率增加的时候,介质损耗也会大幅增加.间隙波导技术(Gap Waveguide, GWG)^[8]的出现可以很好地解决上述问题.间隙波导技术是基于平行板波导构成的新型低损耗传输线,一面是理想电导体(Performance, Efficiency and Comfort, PEC),另一面设计成周期性表面,这种周期性表面就是电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构,可以看作理想磁导体,最典型的电磁带隙结构就是周期性的金属销钉和蘑菇形结构.当两个金属平板的间距小于等于1/4工作波长时,这个间隙就会成为一个高阻区域,可以阻止一定频率范围内任何方向电磁波的传输,形成电磁带隙,这个带隙范围可以由周期性表面的具体尺寸来确定.间隙波导技术中导波结构一般有3种:金属脊、金属槽和金属带,只要在周期性表面中引入导波结构,就可以将电磁波限制在理想电导体和导波结构之间的空气中传播.跟传统的波导不同,间隙波导不需要两部分导体紧密相连来防止电磁波的泄漏.这样,就可以将整体结构分为几部分来加工,最后再进行合固装配,大大降低了加工的难度和成本.而且,相比于SIW和微带线,间隙波导的电磁波因为是在空气中传播,所以大大地减少了介质损耗和导体损耗.因此,间

隙波导作为一种很有发展前景的传输线技术被广泛研究^[9-11].

本文基于槽间隙波导技术,利用多缝隙耦合理论提出了一个新型0 dB前向波定向耦合器,并且进行了实物加工验证,它工作频段为27.1~31.5 GHz,带内最大插入损耗约为0.5 dB,且带内回波损耗和隔离均小于-10 dB,耦合器的相对带宽为14.7%(中心频率30 GHz).相比于目前已有的一些定向耦合器的研究,本文提出的耦合器具有带宽、损耗低以及易加工等优点.值得一提的是,本文设计的耦合器可以轻松地应用到其他的毫米波频段,只需要改变销钉单元的尺寸产生相应的电磁带隙即可.

2 定向耦合器的理论分析

设计的0 dB前向波定向耦合器的结构如图1所示.端口1,2,3和4分别是输入、直通、耦合和隔离端口.

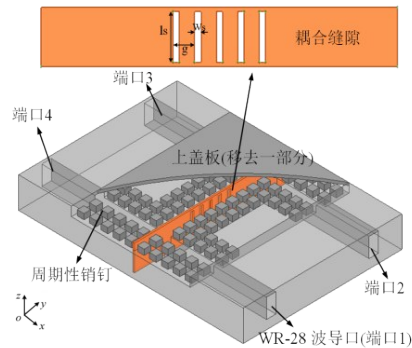


图1 基于槽间隙波导的前向波0 dB定向耦合器

P_1 为1端口的输入功率, P_2, P_3 和 P_4 分别是端口2,3,4的输出功率,则耦合系数、隔离度、方向性和插入损耗定义如下:

$$C = 10 \log \frac{P_1}{P_3} = 20 \log \frac{1}{|S_{31}|} \quad (1)$$

$$I = 10 \log \frac{P_1}{P_4} = 20 \log \frac{1}{|S_{41}|} \quad (2)$$

$$D = 10 \log \frac{P_3}{P_4} = 10 \log \frac{P_1}{P_4} - 10 \log \frac{P_1}{P_3} = I - C \quad (3)$$

$$IL = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (4)$$

耦合器的工作原理如图2所示.为了增加耦合器的工作带宽,采用了多缝隙耦合技术来设计该定向耦合器^[12].

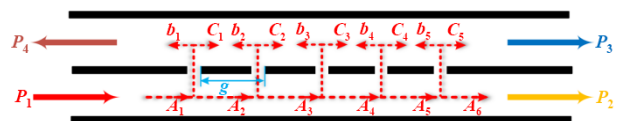


图2 提出耦合器的工作原理

根据图2所示的多缝隙耦合示意图,可以得到:

$$P_2 = A_6 \quad (5)$$

$$P_3 = \sum_{n=1}^5 A_n C_n e^{-j\beta(5-n)g} \quad (6)$$

$$P_3 = \sum_{n=1}^5 A_n b_n e^{-j\beta(n-1)g} \quad (7)$$

此处, A_n 被表示为

$$A_n = \begin{cases} P_1, & n=1 \\ P_1 e^{-j\beta(n-1)g} \times \prod_{i=1}^{n-1} (1-b_i-C_i), & n=2, 3, 4, 5, 6 \end{cases} \quad (8)$$

对于小缝隙耦合,耦合系数(C_n)和隔离系数(b_n)都是和频率无关的变量. 传统的多缝隙耦合理论^[13]设计缝隙耦合器的前提是假设每个耦合缝隙上输入信号幅度都是一样的,因为每个耦合缝隙都只耦合很小一部分能量. 但是,这个并不适用于强耦合. 因为强耦合时,耦合缝隙比较大,大部分的输入功率会被耦合到副

传输线,因此每个耦合缝隙上的输入信号幅度并不相同. 所以,对于强耦合时的多缝隙耦合,耦合系数和隔离系数可以由式(9)来计算^[14]:

$$C_n = b_n = 0.508 \times W_s^3 \times \frac{\tan\left(\frac{\pi f}{2f_{c0}}\right)}{2f_{c0}} e^{\left(-\frac{2\pi h_m f Q}{f_{c0}}\right) \sqrt{1-\left(\frac{f}{f_{c0}}\right)^2}} \quad (9)$$

这个计算公式考虑了耦合缝隙谐振频率(f_{c0})的影响,因为这种矩形缝隙可以等效为偶极子,所以振频率主要受耦合缝隙长度的影响. 指数项是对耦合板厚度(h_m)对耦合系数影响的一个修正, Q 是经验参数,与耦合板的厚度有关. 一定范围内,耦合板厚度越小,耦合越强,但是当耦合板厚度较小时,对耦合的影响几乎可以忽略,这里考虑到耦合板的支撑强度,厚度取为0.5 mm. 根据式(6)、式(8)、式(9),将5个耦合缝隙上传输到端口3的能量叠加到一起可以得到设计的耦合器的耦合度为

$$C = 10 \log \left| \frac{1 - \left(1.016 \times W_s^3 \times \frac{\tan\left(\frac{\pi f}{2f_{c0}}\right)}{\pi f / 2f_{c0}} e^{\left(-\frac{2\pi h_m f Q}{f_{c0}}\right) \sqrt{1-\left(\frac{f}{f_{c0}}\right)^2}} \right)^5}{2} e^{-j\beta 4g} \right| \quad (10)$$

从式(10)中可以看出,缝隙宽度 W_s 与耦合度密切相关. 缝隙之间的距离 g 太小,相邻缝隙就会产生边缘耦合,对耦合的平坦度有很大的影响,所以会进一步影响所设计耦合器的工作带宽. 考虑到空间限制和所需的电性能,耦合缝隙的间距初值取为1/4工作波长. 这样,隔离端口得到的是消逝波,大部分能量将被传输到耦合端口,缝隙长度的初值选择为5 mm,使耦合缝隙谐振频率在30 GHz左右,耦合缝隙宽度的初值选为0.5 mm,使耦合度接近0 dB. 最后,对相关变量进行优化以更好地实现想要的电性能.

3 设计与仿真

提出的定向耦合器设计分为5步:第1步是选择合适的周期性销钉单元尺寸来产生中心频率在30 GHz左右,且覆盖目标工作频带的阻带来防止电磁波的泄漏;第2步是利用前面设计的销钉单元来设计槽间隙波导传输线,以产生合适的通带;第3步是设计宽带的从槽间隙波导到标准WR-28波导的过渡转换以便于加工后的测试;第4步是利用多缝隙耦合理论得出影响耦合水平的相关参数并估算其初始尺寸;第5步需要对相关参数进行优化以使所设计的定向耦合器在工作频带上更好地实现所需要的电特性.

3.1 EBG单元和槽间隙波导传输线的设计

提出的槽间隙波导传输线结构及其S参数分别如图3和图4所示,该结构由两个平行的金属板和底板上若干排周期性的金属销钉组成. 底层金属板上有凹槽,

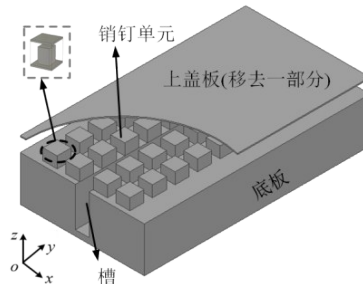


图3 槽间隙波导传输线结构

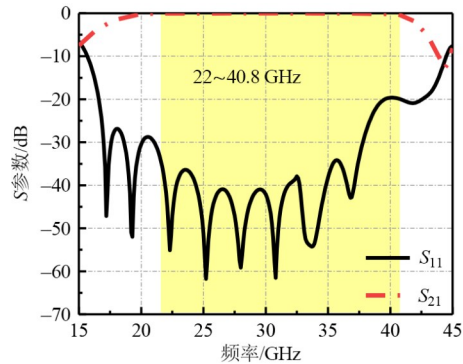


图4 槽间隙波导传输线的S参数

在凹槽两边各有2排周期性销钉单元,以形成电磁带隙. 由于周期性销钉单元的电磁阻带效应,电磁场就会被限制在2块金属板之间,沿着凹槽传输. 该传输线通带为22~40.8 GHz. 销钉单元的色散图如图5所示,可以看出销钉单元的阻带为22~43.2 GHz.

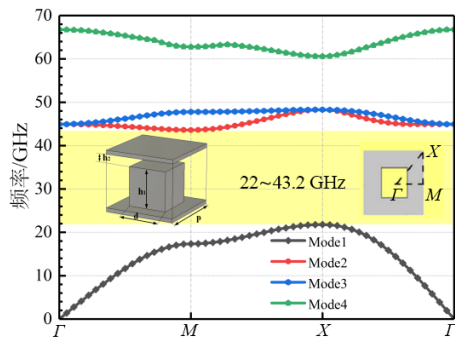


图5 销钉单元色散图

3.2 槽间隙波导到标准 WR-28 波导的过渡转换

为了使设计的耦合器便于加工后测量,本文设计了宽带的槽间隙波导到标准 WR-28 波导的过渡转换.图 6 是设计的槽间隙波导到 WR-28 的过渡转换结构,在槽的末端放置两个切角,以改变电磁波的传输方向,实现电场 90° 的转变.由于标准 WR-28 波导和设计的槽间隙波导之间存在高度差,所以,在改变电磁波的传输方向后在凹槽中加了 3 个阶梯,以减少槽间隙波导到标准 WR-28 波导的反射.图 7 是设计的过渡结构的 S 参数,从图中可以看出,该过渡结构的工作频带为 22.6~36.8 GHz.整个频带内平均回波损耗小于 -15 dB.

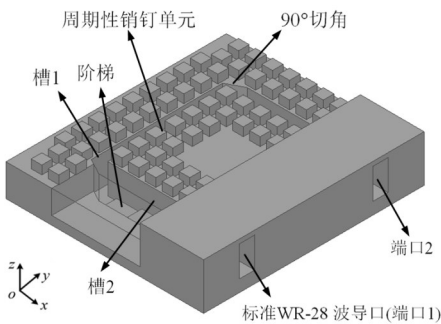


图6 槽间隙波导到 WR-28 的过渡转换结构

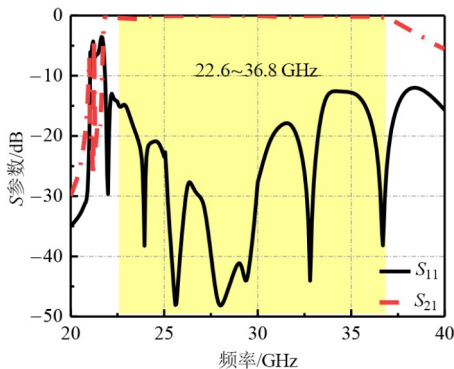


图7 槽间隙波导到 WR-28 过渡转换结构的 S 参数

3.3 耦合器的设计

基于槽间隙波导技术设计的 0 dB 前向波定向耦合器的结构如图 1 所示.该耦合器由两个相邻的槽间隙波导构成,它们中间是一层金属壁,即耦合板,中间的耦合板和上下金属板直接相连.耦合板上有 5 个耦合缝隙用于实现耦合. l_s , W_s 和 g 分别是耦合缝隙的长度、宽度和间距.设计的定向耦合器的相关参数如表 1 所示.

表 1 设计的定向耦合器相关参数 单位:mm

h_1	h_2	d	p
2	0.4	2.5	0.4
l_s	W_s	g	h_m
5.6	0.75	2.75	0.5

设计的耦合器在 30 GHz 的电场分布如图 8 所示,可以看出,电磁波基本全部从输入端口 1 耦合到了端口 3.图 9 是设计的耦合器仿真 S 参数,可以看出在 27.1~31.5 GHz 频带内,基本实现了 0 dB 的耦合,最大插入损耗仅 0.2 dB,带内平均插入损耗约为 0.4 dB,且回波损耗与隔离均小于 -10 dB.

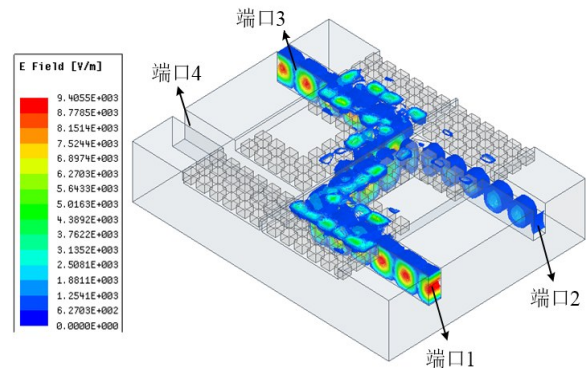


图8 设计的耦合器 30 GHz 的电场分布

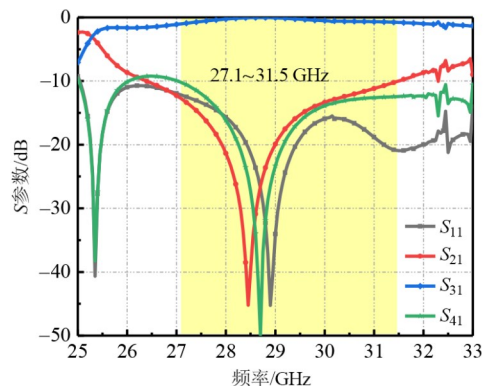


图9 设计的耦合器仿真 S 参数

4 测试结果与讨论

本文设计的耦合器加工实物图和测试图如图 10 所示.

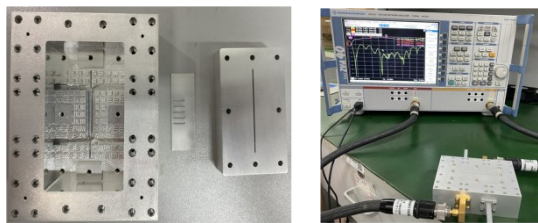


图10 加工的定向耦合器实物图以及测量

由于间隙波导的上下导体之间不需要电接触,所以该耦合器可以分成3部分加工再进行合固装配.设计的定向耦合器由下底板、上盖板和耦合板这3部分组成,耦合板可以直接插入下底板中.将该3部分装配好并安装上标准WR-28波导法兰和匹配负载即可用矢量网络分析仪进行测试.图11(a)和(b)是设计的定向耦合器的仿真和测量的 S 参数,从图中可以看到,测量结果和仿真结果基本一致,它们之间的差异可能是由金属表面粗糙度、装配误差以及接插件损耗造成的.测量结果表明,在27.1~31.5 GHz频带范围内,回波损耗和隔离均低于-10 dB.带内最大插入损耗约为1.1 dB.测试所

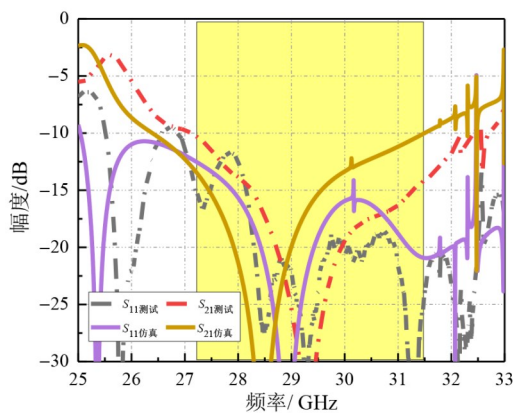
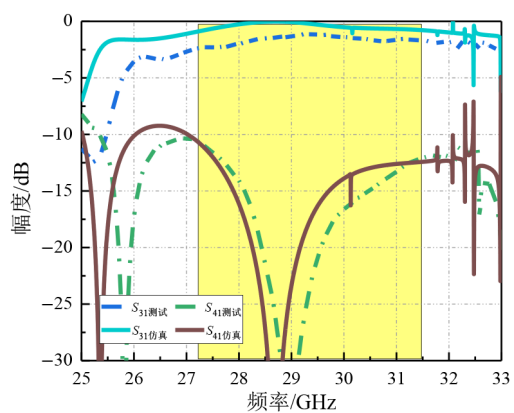
(a) S_{11}, S_{21} (b) S_{31}, S_{41}

图11 仿真和测量结果的对比

用的标准WR-28波导法兰,官网显示的连接损耗约为0.3 dB,因此耦合器的实际最大插入损耗约为0.5 dB.可以看出,设计的耦合器在30 GHz附近的频带内基本实现了平坦的0 dB耦合.通过实际加工测量验证了设计的耦合器的可行性.

表2给出了本工作与一些用其他类型导波结构设计的定向耦合器的性能对比^[2,5,6,15,16].文献[2]用双环微带线结构设计了0 dB定向耦合器,但是带宽只有4.8%,且带内最大插入损耗大于1 dB.文献[5]用了SIW技术设计的0 dB耦合器,工作在35 GHz的毫米波频段,虽然带宽达到了17.6%,但是因为电磁波在介质中传输,插入损耗比较大,并且仅在仿真软件中实现,并没有实物测试去验证设计的定向耦合器.从表2可以看出,本文设计的前向波定向耦合器具有较宽的带宽和较低插入损耗,且更易加工制造,装配简单.并且,虽然本文设计中定向耦合器工作在30 GHz频段,但是只需要改变周期性销钉单元的尺寸即可得到包含其他毫米波频段的阻带,由此即可设计工作在其他频段的间隙波导耦合器,设计十分灵活.

表2 与其他定向耦合器性能的对比

文献	中心频率/GHz	传输线类型	最大插入损耗/dB	S_{11} /dB	带宽
[2]	2.0	微带线	1.00	<-10	4.8%
[5]	35	基底集成波导	0.84	<-20	17.6%
[6]	10.5	基底集成波导	0.65	<-10	4.7%
[15]	60	印刷脊波导	0.50	<-10	11.7%
[16]	20	印刷脊波导	0.95	<-15	10.5%
本文	30	槽间隙波导	0.50	<-10	14.7%

5 结论

本文提出了一种基于槽间隙波导技术的宽带0 dB前向波定向耦合器,适用于毫米波频带.在27.1~31.5 GHz(14.7%)的频带上所设计的定向耦合器具有宽带平坦的0 dB耦合水平,回波损耗和隔离均低于-10 dB,带内最大耦合水平约为0.5 dB.本文设计的0 dB前向波定向耦合器具有带宽、损耗低和易加工等优点.

参考文献

- [1] TING H L, HSU S K, WU T L. A novel and compact eight-port forward-wave directional coupler with arbitrary coupling level design using four-mode control technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(2): 467-475.
- [2] ZHAO W B, DONG T, WANG X. A novel 0dB microstrip coupler with double-ring[C]//2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. Chongqing: IEEE, 2016: 128-131.

- [3] FATHELBAB W M. The synthesis of a class of branch-line directional couplers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(8): 1985-1994.
- [4] ISHIBASHI H, KURIHARA M, TAHARA Y, et al. Waveguide loop-type directional coupler using a coupling conductor with protuberances[C]//2015 European Microwave Conference (EuMC). Paris: IEEE, 2015: 1026-1029.
- [5] DOGHRI A, DJERAFI T, GHIOTTO A, et al. Substrate integrated waveguide directional couplers for compact three-dimensional integrated circuits[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(1): 209-221.
- [6] TIWARI R, MUKHERJEE S, BISWAS A. Design and characterization of multi-layer substrate integrated waveguide (SIW) slot coupler[C]//2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Lisbon: IEEE, 2015: 1-4.
- [7] DJERAFI T, WU K, TATU S O. 3dB 90° hybrid quasi-optical coupler with air field slab in SIW technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(4): 221-223.
- [8] KILDAL P S, ALFONSO E, VALERO-NOGUEIRA A, et al. Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 84-87.
- [9] SHARKAWY M AL, KISHK A A. Wideband beam-scanning circularly polarized inclined slots using ridge gap waveguide[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 1187-1190.
- [10] SHAMS S I, KISHK A A. Wide band power divider based on Ridge gap waveguide[C]//2016 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM). Montreal: IEEE, 2016: 1-2.
- [11] BIRGERMAJER S, JANKOVIĆ N, CRNOJEVIĆ-BENGIN V, et al. Forward-wave 0 dB directional coupler based on microstrip-ridge gap waveguide technology[C]//2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS). Nis: IEEE, 2017: 154-157.
- [12] LEVY R. Improved single and multiaperature waveguide coupling theory, including explanation of mutual interactions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1980, 28(4): 331-338.
- [13] SCHMIEDEL H. Series-configuration of multi-line directional-coupler sections with improved coupling[C]//2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Fort Worth: IEEE, 2004: 339-342.
- [14] COHN S B. Microwave coupling by large apertures[J]. Proceedings of the IRE, 1952, 40(6): 696-699.
- [15] ALI M M M, SEBAK A. Compact printed ridge gap waveguide crossover for future 5G wireless communication system[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(7): 549-551.
- [16] FARAHANI M, AKBARI M, NEDIL M, et al. A novel low-loss millimeter-wave 3-dB 90° ridge-gap coupler using large aperture progressive phase compensation[J]. IEEE Access, 2017, 5: 9610-9618.

作者简介



沈瑞亮 男,1997年出生,安徽马鞍山人.南京理工大学通信与信息系统专业研究生.主要研究方向为射频电路与器件.
E-mail: qwyk_srl@njjust.edu.cn



冯文杰(通讯作者) 男,1985年出生,河南商丘人.南京理工大学光电学院教授、博士生导师.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.
E-mail: fengwenjie1985@163.com



倪啸宇 男,1996年出生,山东威海人.南京理工大学电子工程与光电技术学院研究生.主要研究方向为微波电路与天线阵列.
E-mail: 993566784@qq.com



王慧 女,1998年出生,福建宁德人.南京理工大学电子工程与光电技术学院硕士研究生.主要研究方向为微波毫米波器件.
E-mail: huiwang1998@njjust.edu.cn



施永荣 男,1988年出生,江苏兴化人.南京航空航天大学电子信息工程学院/集成电路学院研究员.主要研究方向为无人机载射频载荷技术.
E-mail: yongrongshi@nuaa.edu.cn