

基于硅微机械加工波导W波段功率合成放大器

成海峰^{1,2}, 朱翔², 侯芳^{1,2}, 胡三明^{1*}, 郭健¹, 石归雄²

(1. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096;

2. 南京电子器件研究所, 江苏南京 210016)

摘要: 基于硅微机械加工工艺, 设计并制作一款W波段4路硅基波导功分/合成器。通过在8英寸的硅晶圆上采用干法刻蚀和晶圆级键合等工艺途径实现了硅基波导结构。根据硅微机械加工工艺的特点, 设计了一种基于H面T型结和3dB耦合桥结构的波导功分/合成器。该功分/合成器表现出的损耗为0.25 dB。最后, 采用该硅基功分/合成器对4只2W的GaN功率单片进行了功率合成, 研制了W波段硅基合成功率放大器。测试结果表明, 在92~96 GHz的频率范围内, 输入功率30 dBm的条件下, 输出功率在7.03 W至8.05 W之间, 典型电源附加效率为15%, 平均合成效率为88%。

关键词: W波段; 硅微机械加工; 功率分配/合成器; 固态功率放大器; 氮化镓

中图分类号: TN73 **文献标识码:** A

W-band power combining amplifier based on silicon micromachined waveguide

CHENG Hai-Feng^{1,2}, ZHU Xiang², HOU Fang^{1,2}, HU San-Ming^{1*}, GUO Jian¹, SHI Gui-Xiong²

(1. State Key Laboratory of Millimeter Wave, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Electronic Device Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the silicon micromachined technology, a W-band 4-way silicon waveguide power splitter/combiner was designed and fabricated in this paper. The silicon waveguide has been realized by dry etching and wafer level bonding on an 8 inch silicon wafer. According to the characteristics of silicon micromachining, a waveguide power splitter/combiner based on H-plane T-junction and 3dB coupler was designed. This silicon splitter/combiner exhibits extremely low loss. A silicon power combined PA module was developed by using this silicon power splitter/combiner together with four 2W GaN MMICs. The output power is between 7.03W and 8.05W across the frequency range of 92 to 96GHz with an input power of 30dBm, and the typical PAE is 15%. The average combining efficiency is 88%.

Key words: W band, silicon micromachined, power splitter/combiner, solid state power amplifier (SSPA), GaN.

PACS: 84. 30. Le, 84. 40. -x

引言

受单片电路工艺及设计的限制, 单个单片功率放大器的输出功率有限, 因此功率合成是大功率固态功放研制中最常用的技术。通过将几个甚至数十上百个单片功率放大器的输出功率叠加, 可以将

其输出功率提升几倍乃至数百倍。W波段具有波长短、设备体积小等优点, 在通信、雷达等应用中越来越受到重视。在国家相关重大计划的支持下, 南京电子器件研究所已经研制出基于GaN工艺的瓦级单片功率放大器^[1]。为了进一步提高输出功率,

收稿日期: 2020-03-26, 修回日期: 2020-06-08

Received date: 2020-03-26, Revised date: 2020-06-08

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2019YFB2204701), 国家自然科学基金(61831006, 62022023), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2242019K40196), 江苏省自然科学基金(BK20190011)

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFB2204701), National Natural Science Foundation of China (61831006, 62022023), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2242019K40196), the Natural Science Foundation of Jiangsu (BK20190011)

作者简介(Biography): 成海峰(1983-), 男, 江苏人, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究领域为固态微波毫米波功率合成技术

E-mail: chenghay@hotmail.com

*通讯作者(Corresponding author): sanming.hu@seu.edu.cn

近年关于W波段功率合成技术的研究已经出现了大量的报道。合成方式包括波导T型结合成^[2-4],径向合成^[5-8],空间合成^[9]等。

合成效率是功率合成最重要的指标。从目前现有研究成果来看,W波段合成功放的合成效率明显较低。采用二进制波导合成和多路径向合成等方式(含输出波导转换)的合成功放效率都难以超过90%^[2-6]。而在Ka波段波导二进制合成和径向合成的合成效率可以超过93%,根据美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的研究报告,该合成效率都已接近其理论极限值^[10-11]。

W波段合成效率偏低是因为频率越高,波导腔的尺寸越小,因此对于波导等结构的加工精度要求越来越高。当前的金属结构加工精度大多不超过10 μm的量级。W波段的标准波导口尺寸为2.54 mm×1.27 mm,对于一些合成结构或者转换结构,局部的尺寸可能小于0.5 mm。在复杂的多路合成结构中,加工误差的累积将对其性能产生明显的影响。因此,在W波段采用新的高精度加工工艺是提高合成器合成效率的最有效途径。

硅微机械加工(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)技术是以半导体工艺为基础,伴随着微电子集成电路加工技术和超精密机械加工技术的发展而产生的一种新型技术。硅微机械加工技术融合了光刻、腐蚀、薄膜、键合、硅微加工等多种精密加工技术,带来了精细的加工手段,尤其是三维加工技术,使原本难以实现的结构成为可能。目前国内外已经开展了一些基于硅微机械加工工艺制作高频波导合成器的研究,但是绝大部分仅为无源验证^[12-13]。

本文利用硅微机械加工工艺实现高精度W波段的4路功分/合成器,该合成器表现出了很高的幅相平衡性和合成效率。此外,本文还采用该合成器对4只W波段GaN功放芯片进行功率合成,在92~96 GHz的频带内实现了8 W的典型输出功率,平均合成效率达到了88%,下文将进一步进行详细的介绍。

1 硅微机械波导加工工艺

以硅为基础的微机械加工工艺主要分为两大类。表面微加工工艺和体微加工工艺。表面微加工技术,把MEMS的机械部分制作在沉积于硅晶体的表面膜上。然后使其局部以硅衬底分离,形成具有可动或悬空结构的MEMS器件。体微加工工艺采用湿法或者干法有选择地刻蚀衬底。通常在掩膜

层的辅助下形成三维微机械结构。该工艺主要应用于高精度特性器件的加工。

本文采用硅微机械加工工艺实现硅基波导功分/功合结构,主要利用的技术包含光刻、电镀、干法刻蚀和晶圆级键合,工艺精度可达到0.5 μm。其中电镀和干法刻蚀为关键工艺,电镀工艺的精度决定了波导腔体侧壁金属的粗糙度;干法刻蚀的难点在于如何获得更大的刻蚀深宽比和控制侧壁与腔体的完美垂直。本文以南京电子器件研究所的8英寸MEMS工艺线为平台,采用硅衬底厚度为0.725 mm的两片硅晶圆堆叠方案实现波导腔体结构。图1展示了该工艺步骤,首先制备SiO₂氧化掩膜层,光刻氧化层形成深腔刻蚀掩膜,在此基础上使用干法刻蚀工艺去除未被掩膜覆盖的硅衬底,形成半边的波导腔,然后在波导腔表面溅射金属金,电镀加厚。在另一个硅片上采用相同的工艺方法,形成另一半边的波导腔。接下来将两片硅片以金-金热压键合的方式键合在一起,形成波导腔,最后,可以通过设计的尺寸切割为单个硅基波导器件。

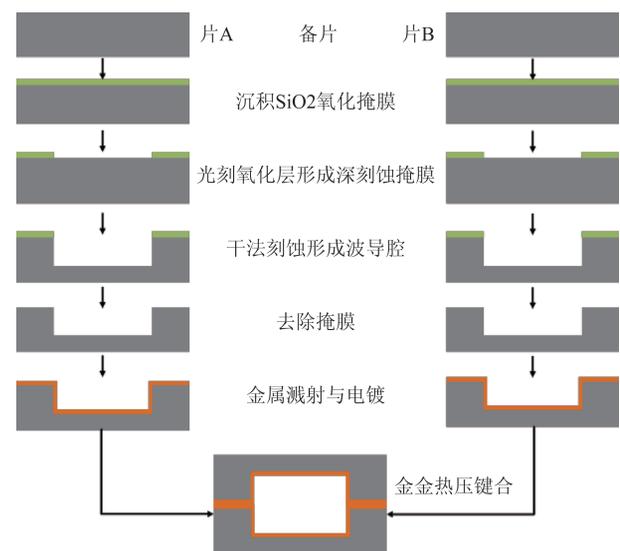


图1 硅基波导制作工艺

Fig. 1 Fabrication process of silicon waveguide

基于硅微机械加工技术的波导器件加工精度高,表面光洁度高,器件一致性好,体积小,十分适合制作毫米波甚至太赫兹波段的波导器件。

2 硅基4路波导功分/合成器设计

根据上文介绍的工艺特点,本文采用两层8英寸的硅晶圆堆叠实现波导腔。每层硅片的厚度为0.725 mm,两层堆叠以后可以实现1.45 mm的总厚

度。W波段的标准波导尺寸为 $2.54\text{ mm}\times 1.27\text{ mm}$ ，其中E边的 2.54 mm 的尺寸是由波长决定的，无法调整更改，因此两层硅片的厚度内无法容纳波导的E边。H边尺寸为 1.27 mm ，且H边的尺寸主要决定波导的特征阻抗，与其工作频率无关，因此可以选择合适的H边尺寸来制作波导功分/功合结构。为了保证波导壁具有一定的厚度以实现足够的机械强度，选择波导H边尺寸为 1 mm （即减高波导，不影响该波段传输特性）。在两个硅片上分别刻蚀出 0.5 mm 深的腔体，两片硅片键合即可形成高度为 1 mm 的波导腔。

2.1 波导H-T型功分/合成器设计

波导T型结是一种常见的功分/功合结构，根据波导的传输方式不同主要可以分成E-T(E面T型结)和H-T(H面T型结)两种形式。传统的采用机械加工实现的H-T型功分/合成器，由于受制于加工工艺，无法加工出很薄的隔片。即使加工出隔片，也无法实现螺钉合股。因此，通常会采用三角结构来实现功分/功合^[14]。而硅基波导功分/合成器采用了光刻蚀工艺，可以实现很薄的隔片，而且通过高精度对位键合可以很容易的实现两片的合股。设计使用Ansys HFSS软件进行仿真优化，结构模型如图2所示。波导的宽边尺寸 $a=2.54\text{ mm}$ 。通过优化薄隔片的深度 h_1 和厚度 s_1 ，获得更好的驻波和插入损耗。

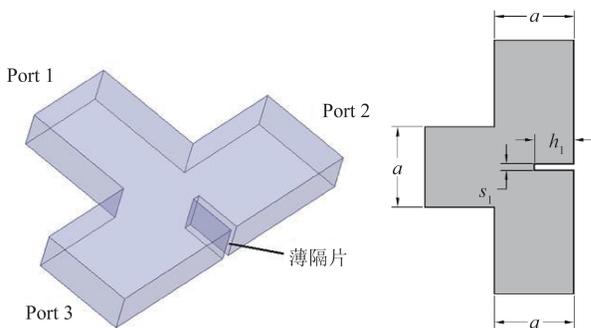


图2 H-T型功分/合成器模型
Fig.2 Model of the H-T splitter/combiner

最终优化结果为隔片的厚度 $s_1=0.2\text{ mm}$ ，深度 $h_1=1.25\text{ mm}$ 。图3展示了最终的仿真结果，仿真结果显示在 $85\sim 105\text{ GHz}$ 的频段范围内， S_{11} 小于 -15 dB ， S_{21} 大于 -3.15 dB 。

2.2 波导3 dB耦合桥设计

波导3 dB桥是一种常见的平衡式合成结构。在工程应用中使用3 dB耦合桥可以获得很好的端口驻波。根据两层8英寸的硅晶圆键合的厚度，设

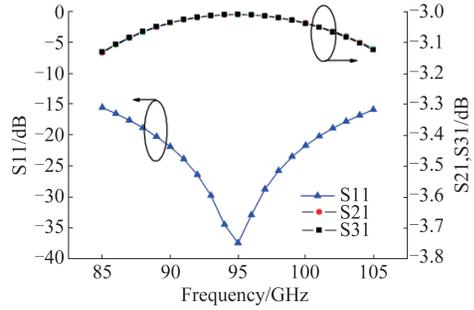


图3 H-T型功分/合成器仿真结果
Fig.3 Simulated results of the H-T splitter/combiner

计了一种H边尺寸为 1 mm 的 3 dB 波导耦合桥。图4展示了该波导桥的仿真模型。该耦合器的4个端口分别为：1. 公共端，2. 隔离端，3. 直通端，4. 耦合端。

优化模型中的各尺寸以获得更好的驻波和插入损耗。最终优化的尺寸为 $s_1=0.2\text{ mm}$ ， $l_1=1.4\text{ mm}$ ， $l_2=1.7\text{ mm}$ ， $l_s=3.2\text{ mm}$ 。仿真结果如图5所示。在 $80\sim 105\text{ GHz}$ 的频段范围内，回波损耗(S_{11})和隔离度(S_{21})均优于 -20 dB 。

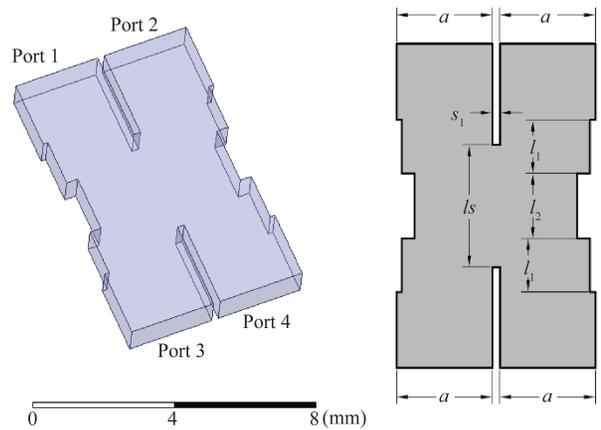


图4 3 dB波导耦合桥的仿真模型
Fig.4 Model of the 3 dB coupler

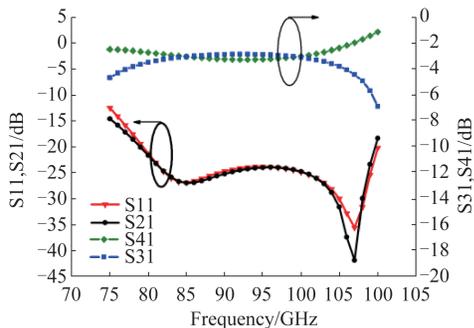


图5 3 dB波导耦合桥的仿真结果
Fig.5 Simulated results of the 3 dB coupler

2.3 4路功分/合成器设计

将上述的两种合成器结合实现4路合成器,将两个H-T型功分/合成器的公共端通过90°拐弯连接至3 dB波导桥的直通端和耦合端。图6为该4路功分/合成器的仿真模型。端口1为公共端,端口2-5为4个分支端口,端口6为隔离端。所有波导口通过阶梯变换结构将波导口转向硅片的上表面,图7为该4路功分/合成器的剖面图。将所有波导口都设置同一平面是为了便于后续的安装,可以通过烧结将波导口和外部结构连接。通过优化阶梯变换结构的尺寸,获得更好的驻波和带宽特性。

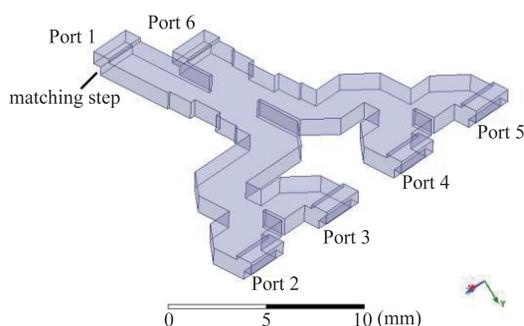


图6 4路功分/合成器的仿真模型

Fig. 6 Model of the 4-way splitter/combiner



图7 4路功分/合成器剖面图

Fig. 7 Sectional view of the 4-way splitter/combiner

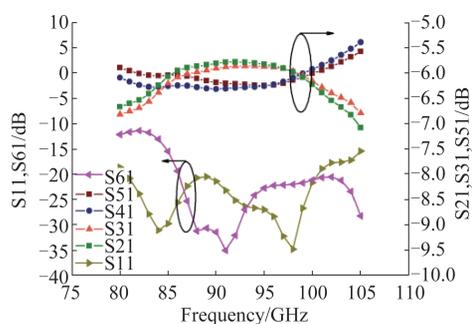


图8 4路功分/合成器的仿真结果

Fig. 8 Simulated results of the 4-way splitter/combiner

图8为4路功分/合成器的仿真结果,在85~100 GHz的频段范围内,回波损耗(S11)和隔离度(S61)均优于-20 dB,带内的平均插入损耗约为0.25 dB。

2.4 4路功分/合成器测试

图9为加工完成的硅基4路功分/合成器安装入测试夹具中的实物照片。该功分/合成器的尺寸为

24.6 mm×21.5 mm×1.45 mm,将硅基波导功分/合成器与可伐载体烧结,再通过测试夹具将波导口转换为标准波导口,隔离端波导口采用吸波材料作为匹配负载,并通过4个直通波导实现2个功分/合成器背靠背无源测试。

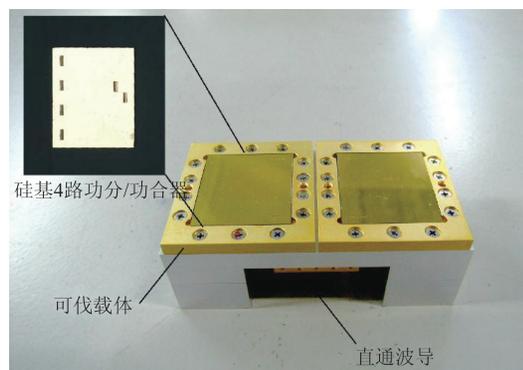


图9 硅基4路功分/合成器实物及测试夹具照片

Fig. 9 Photographs of the fabricated 4-way splitter/combiner and the test fixture

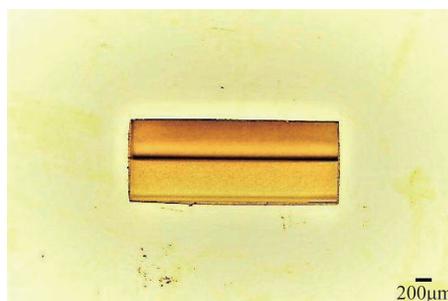


图10 波导口的局部放大照片

Fig. 10 microscope view of waveguide port

图10展示了该硅基4路功分/合成器其中一个波导口的局部放大照片,从中可以看到该波导口和内部的阶梯变换结构。从照片可以看出,采用硅微机械加工的波导口边缘平整,波导表面光洁度高。根据已有研究表明,波导表面的光洁度直接影响波导传输损耗,并且频率越高表面光洁度对波导传输损耗的影响更大^[15]。另一方面采用硅微机械加工带来的纳米级的加工精度,可以保证加工的合成结构和仿真设计的保持较好吻合度,同时保证合成器具有较高的合成效率。

硅基4路功分/合成器插入损耗和回波损耗的背靠背测试结果如图11所示。测试结果显示在85~100 GHz的频段范围内,S11小于-12 dB,带内的平均插入损耗约为0.5 dB,因此单个硅基4路功分/合成器的插入损耗为0.25 dB,预计合成效率为

94.4%。相比传统的 W 波段 4 路波导合成器^[2-3]展现出了非常好的性能。

上述测得的数据中,插入损耗的测试需要扣除测试夹具的损耗,夹具的损耗测试会有一些的误差,因此最后计算获得的功分/合成器的插损数据具有一定的误差累积。

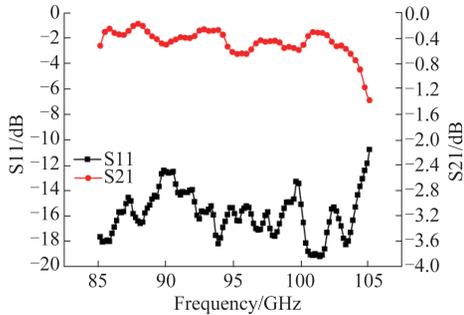


图 11 硅基功分/合成器的插入损耗和回波损耗
Fig. 11 The insertion and return losses of the silicon splitter / combiner

3 硅基合成功放模块的实现

基于上述成功研制的硅基功分/合成结构,我们进行了 4 路合成硅基功放模块的设计,功率分配和功率合成采用相同的结构。本设计中采用的芯片是由南京电子器件研究所研制的 W 波段 2W GaN 功放芯片。该功放芯片采用 4 英寸 GaN HEMT 工艺制造而成,是一种高效率的 AB 类功率放大器。芯片的典型在片测试数据如图 12 所示。

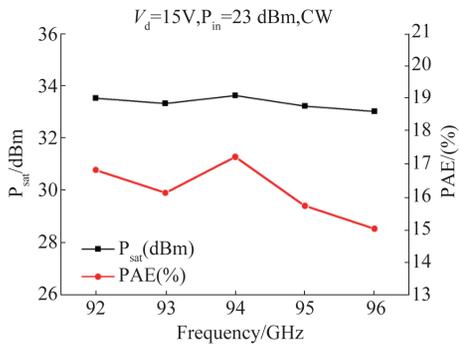


图 12 W 波段 GaN 功放芯片典型测试数据
Fig. 12 The typical tested result of W band GaN MMIC

芯片的输入输出端通过金丝键合与微带相连,再通过微带探针转成波导,并与硅基功分/合成器的波导端口连接。该微带波导转换的结构见图 13。该微带探针采用 0.127 mm 厚的 Rogers 5880 介质板制作,通过波导宽边壁的开孔深入到波导内,在波导内激励 TE₁₀ 模,实现微带和波导之间的过渡,同时在 50

Ω 微带线和探针之间采用高感抗线和 1/4 波长阻抗变换来实现阻抗匹配。该种微带探针结构设计简单,便于装配,可以通过烧结的方式安装至模块上。

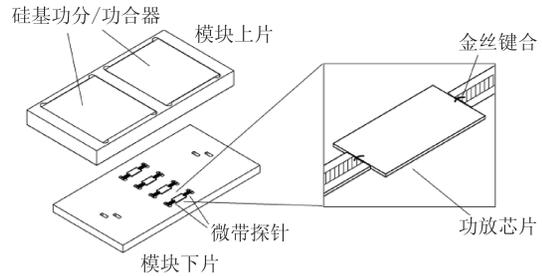


图 13 硅基合成功放模块结构图
Fig. 13 The structure of the silicon combined module

整个硅基合成功放模块的结构如图 13 所示,其中硅基功分/合成器通过焊锡烧结至模块上片,功放芯片和微带探针烧结至模块下片。芯片的输入输出端通过金丝键合与微带相连,再通过微带探针转成波导,并与模块上片的硅基功分/合成器的波导端口连接。其中微带探针采用 0.127 mm 厚的 Rogers 5880 介质板制作,通过波导宽边壁的开孔深入到波导内,是一种常见的微带-波导转换结构^[2,5]。

模块上片需要和硅片烧结,为了保证模块和硅材料的热膨胀系数的匹配,模块上片采用可伐材料进行加工。而模块下片由于需要和功率芯片烧结,需要保证良好的散热,因此采用无氧铜材料进行加工。硅基功分/合成器的隔离端通过使用吸波材料实现吸收负载。图 14 为该硅基合成功放模块的实物照片。该模块的尺寸为 55 mm×28 mm×8 mm,相比传统的波导合成模块具有更小的体积。

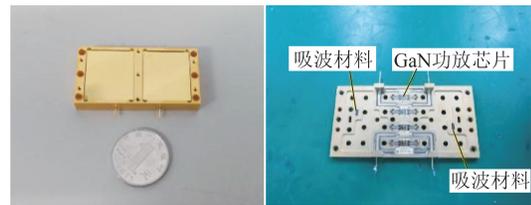


图 14 硅基合成功放模块
Fig. 14 The silicon combined PA module

该硅基合成功放模块的测试系统如图 15 所示。信号源的输出信号通过两级驱动放大器实现 30dBm 的输出驱动功率,用于推动硅基合成功放模块。模块输出通过定向耦合器与功率探头连接。

在连续波条件下的测试结果如图 16 所示,该硅基功放模块的在 92~96 GHz 的频率范围内输出功率

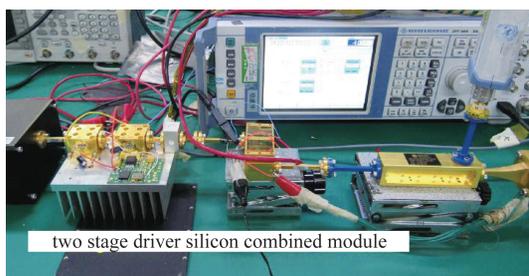


图 15 硅基合成功放模块测试系统

Fig. 15 The test platform of the silicon combined PA module

典型值为 8 W, 在 96 GHz 处功率最低为 7.03 W, 功率附加效率为 13.0%, 在 94 GHz 处达到最大功率为 8.05 W, 功率附加效率达到 15.05%。对比图 11 的芯片在片测试数据, 可以计算得到平均的合成效率 88%。等效的合成损耗为 0.55 dB, 该合成效率数据中包含了合成损耗和探针转换损耗, 相比传统合成方式, 仅 4 路波导的合成损耗就达到 0.5 dB^[2-3], 因此硅基功分/合成器相比传统的波导合成具有更高的合成效率。

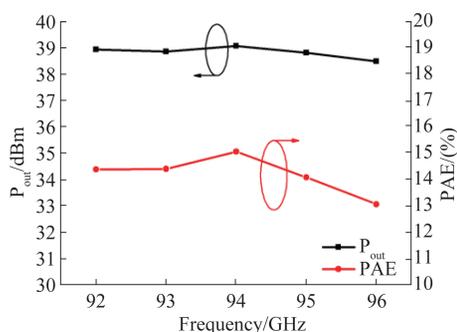


图 16 输出功率、电源附加效率与合成效率

Fig. 16 The measured output power, PAE and combining efficiency

4 结论

本文提出了一种基于硅微机械加工工艺的硅基 4 路波导功分/合成器。基于 8 英寸 MEMS 工艺平台, 采用光刻蚀工艺在 0.725 mm 厚的硅片上刻蚀出波导腔体结构, 再在波导腔体内侧镀金, 最后通过金-金热压键合工艺实现两层硅片的堆叠, 最终实现硅基波导结构。结合此种工艺的特点, 设计和实现了一种 W 波段 4 路硅基功分/合成器。并采用该种硅基功分/合成器对四片 W 波段 2W GaN 功放芯片进行了功率合成, 制作了硅基合成功放模块。经测试, 该模块在 92~96 GHz 的频带范围内, 获得了 8W 的典型输出功率, 电源附加效率 15%, 合成效率 88%, 相比传统波导合成功放模块^[2-3]具有更小的体

积和更高的合成效率。在该技术及合成单元基础上, 有望实现体积紧凑、高效合成的多路合成功率放大器, 大大提高 W 波段固态功放的性能指标。

硅基合成功放是硅微机械加工波导在固态功放领域应用的一种有益的尝试。该技术预期在毫米波及更高频率会展现出很好的工程应用前景。

References

- [1] Wu S B, Gao J F, Wang W B, *et al.* W-Band MMIC PA with ultrahigh power density in 100-nm AlGaIn/GaN technology [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2016, **63**(10): 3882-3886.
- [2] Ingram D L. Compact W-band solid-state MMIC high power sources [C]. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2000, pp:955-958.
- [3] Kim B, Tran A, Schellenberg J M. Full W-band power amplifier/combiner utilizing GaAs technology [C]. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2012.
- [4] ZHU Xiang, CHENG Hai-Feng, GUO Fang-Jin, *et al.* W-band solid-state combining power amplifier research [J] *Research & Progress of SSE*. (朱翔, 成海峰, 郭方金, 等。W 波段固态合成功放研究. *固体电子学研究与进展*), 2019, **39**(04): 240-244.
- [5] Schellenberg J, Watkins E, Micovic M, *et al.* W-band, 5W solid-state power amplifier/combiner [C]. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2010, pp:23-28.
- [6] Schellenberg J, Tran A, Bui L, *et al.* 37 W, 75-100 GHz GaN Power Amplifier [C]. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2016, pp:1-4.
- [7] HUANG Zhao-Yu, XU Jun, RAN Dong, *et al.* Design of a W-band power amplifier/combiner based on spatial power-combining technique [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (黄昭宇, 徐军, 冉东, 等。基于径向波导合成技术的 W 波段功率放大器设计. *红外与毫米波学报*), 2018, **37**(04): 454-458.
- [8] CHENG Hai-Feng, ZHU Xiang, GUO Jian. Design of W-band low-loss radial power combiner [J]. *Research & Progress of SSE*. (成海峰, 朱翔, 郭健。W 波段低损耗径向功率合成器设计. *固体电子学研究与进展*), 2019, **39**(02): 102-105+115.
- [9] Rob Maaskant, Waqar Ali Shah, Ashraf Uz Zaman, *et al.* Spatial power combining and splitting in gap waveguide technology [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, **26**(7): 472-474.
- [10] Epp L, Khan P, Silva A. Ka-band wide-band gap solid-state power amplifier: hardware validation [J]. *Interplanetary Network Progress Report*, 2005, 162.
- [11] Khan P, Epp L, Silva A. A Ka-band wide-bandgap solid-state power amplifier: architecture performance estimates [J]. *Interplanetary Network Progress Report*, 2005, **162**: 1-17.
- [12] Silicon Micromachined Waveguide Quadrature-Hybrid Coupler at Terahertz Frequency Band [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2015, **36**(8): 709-719.
- [13] Svedin J, Malmqvist R, Beuerle B, *et al.* A 230 - 300 GHz low-loss micromachined waveguide hybrid coupler [C]. *EuMC*, 2017.
- [14] Zhang F, Song K, Li G, *et al.* Sub-THz four-way waveguide power combiner with low insertion loss [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2014, **35**(5): 451-457.
- [15] LI Na. Effect of the surface roughness on electrical properties of high performance microwave electronic equipment [D]. Xidian University (李娜。表面粗糙度对高精度微波电子装备电性能影响的研究. 西安电子科技大学), 2012.