

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106080

基于 MEMS 工艺 W 频段高效功率合成器的设计

于士同 邢小明 夏侯海

(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 传统 W 波段功率合成器因为尺寸大很难与其他平面电路集成,限制了其在小尺寸平台上的应用。为了解决这个问题,开展高效率、小型化功率合成器的研究。提出了一种新型 2 路波导空间功率合成器结构,基于硅材料,使用 MEMS 工艺和晶圆键合三维堆叠技术,在硅基上开展多路功率合成,实现 W 频段高效率、小型化的功率合成。极大提升加工精度,使得整体性能更好、尺寸更小、更易于集成。仿真结果显示,整体结构在 90~96 GHz 频率范围内,回波损耗低于 -22.5 dB,插入损耗优于 -0.22 dB,整体功率合成效率优于 95%。

关键词: MEMS 工艺;空间功率合成;硅基波导;插入损耗;回波损耗

中图分类号: TN626 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Design of high efficient W-band spatial power combiner utilizing silicon micromachining

Yu Shitong Xing Xiaoming Xia Houhai

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: The traditional W-band power combiner is difficult to integrate with other planar circuits because of its large size, which limits its application in small platform. To carry out research on high efficiency and small size power combiner. Present a novel two-way waveguide power combining structure which uses multilayer silicon bulk micromachining techniques. A good performance is achieved by utilizing MEMS and three-dimensional wafer bonding stacking technology. Within the operating band from 90~96 GHz, the return loss is lower than -22.5 dB, the insertion loss is better than -0.22 dB and the simulated result demonstrates an overall combining efficiency of 95%.

Keywords: MEMS technology; spatial power combiner; silicon micromachining waveguide; insertion loss; return loss

0 引言

在 W 频段的毫米波雷达具有频带宽、波长短、波束窄、体积小、功耗低以及穿透性强等特点,其穿透性强的特点能保证雷达受恶劣天气影响较小^[1]。这些特点也使得 W 频段毫米波雷达在汽车防撞、直升机避障、气象探测、导弹导引等方面都具有重要的作用^[2]。而射频收发前端则是微波雷达系统的关键部分,对系统的整体性能有着很大的影响。其中,如何为发射机提供可靠和足够大的微波功率一直是微波理论与技术研究的重要课题。

因此人们研究采用多个固态器件进行功率合成的方法来获得高功率输出。近年来,毫米波和太赫兹频段的功率合成器相继被提出,主要形式有空间功率合成器^[3-5]、平面型功率合成器^[6-7]、辐射状波导功率合成器^[8]等。而与传统混合型以及器件级功率合成相比较,基于波导的空间功率合成技术具有合成效率高,带宽性能好,有效防止辐射损

耗,具有良好散热性能,易于小型化,结构简单易实现等优点,而且在更高的频段如 W 频段也可实现大功率输出^[9]。利用微电子机械系统(MEMS)技术,可以对波导做高精度多层立体的体微加工,加工的精度可以精确到毫米和微米量级,加工的器件精度高、一致性好、结构紧凑,非常适合用于毫米波甚至太赫兹领域^[10]。

因此,本文基于 MEMS 技术,使用多层硅基体微加工技术,提出一种新型的两路波导功率分配、合成结构。使用波导-微带过渡结构与单片微波集成电路(MMIC)相连,利用两个 E 面探针伸入波导窗耦合能量,完成 W 频段高效率功率分配、放大、合成。经过电磁仿真软件 HFSS 建模仿真,结果显示该整体结构在 90~96 GHz 频率范围内,回波损耗均低于 -22.5 dB,插入损耗均优于 -0.22 dB,总体合成效率优于 95%。该结构的设计实现了高效率、小尺寸、低损耗的 W 频段功率合成,能够广泛应用于 W 频段雷达、通信、射电天文、成像、导航、避障等领域;同时在需要大功率

收稿日期:2021-03-21

输出的微波系统和工程应用场景中也具有重要作用。

1 多层硅基波导结构设计

在硅基上进行体微加工为波导类元件的制造、封装提供了许多优势,尤其在微波甚至太赫兹频段更为有利。能够实现微小误差范围内复杂几何组件的精确加工,为多路功率合成提供了工艺基础。

本文设计的 2 路波导空间功率合成器工作于 90~96 GHz 频段,为了确保良好的传输效应,选用 WR10 波导,通过减高将高度从 2.54 mm 减小到 1.8 mm。利用深反应离子刻蚀技术对硅片进行体微加工,使用 6 层晶圆堆叠,其中一段背靠背波导-探针结构示意图如图 1 所示,每层晶圆厚度 500 μm ,层间通过晶晶键合技术,将 6 层结构粘合在一起,在中间形成波导腔结构,介质选用 0.127 mm 的石英玻璃,也为伸入波导腔的探针提供一定的机械支撑。

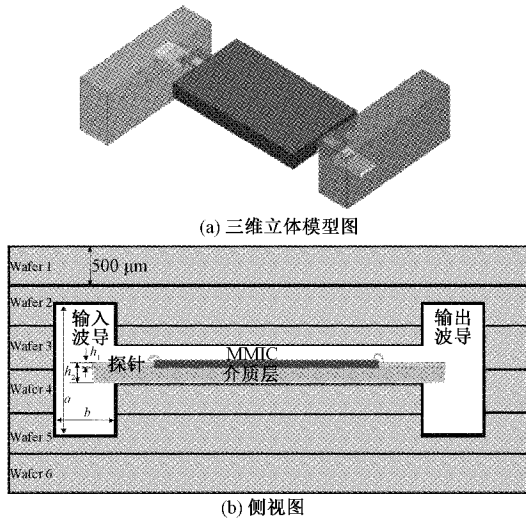


图 1 硅基波导结构

2 功率合成器理论与设计

本文设计的波导空间功率合成器主要由 3 部分组成,先由两路 E 面探针伸入波导等分馈电,然后经过 MMIC 放大,最后再经过波导-微带过渡结构将信号由 T 型结两端合成。

2.1 波导-微带探针过渡结构

波导-微带探针过渡结构是从波导-同轴探针演变而来,满足毫米波频段系统对体积、重量的要求,通过在矩形波导宽边上开缝然后在缝隙中插入的微带探针起耦合作用。常用的波导-微带过渡方式有两类,都是将微带探针从波导宽边的中心插入进行馈电,介质面垂直于波导传输方向的称为 H 面探针^[11];介质面平行于波导传输方向的称为 E 面探针^[12],本文采用如图 2 所示的 E 面探针来实现中心频率为 93 GHz 的过渡。

由电磁场的理论可知,任意一个沿着微带探针方向具

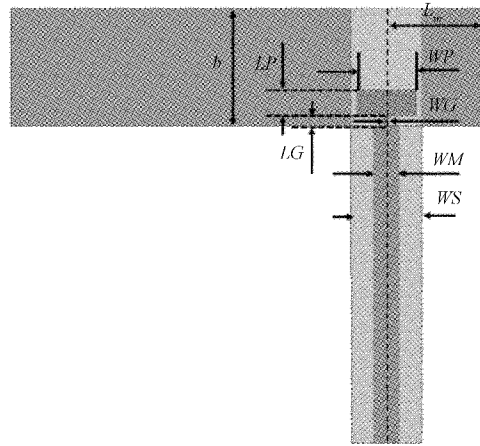


图 2 E 面波导-微带探针过渡结构

有非零电场的波导模式会在探针表面激励起电流,产生准 TEM 模。而根据互易定理,微带探针上的准 TEM 模也将激励起同样的波导模。为了与波导 TE_{10} 紧耦合,探针应从波导宽边中心插入,放置于电场最强的地方。因探针末端电流为零,现假设其电流是无线细线的形式:

$$I = I_0 \times \sin[k_0(l-y)], 0 \leq y \leq l \quad (1)$$

式中: l 为微带探针插入波导的深度。因此可求出探针底部视入的输入阻抗:

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = \frac{P + 2j\omega(W_m - W_e)}{\frac{1}{2} I_0^2 \sin^2 k_0 l} \quad (2)$$

其中, P 为辐射到波导中的功率, $W_m - W_e$ 是由高次模激励的存在于微带探针周围的无功功率。通过计算可得微带探针的辐射电阻为:

$$R_m = \frac{2Z_0}{ab\beta_{10}} \sin^2(\beta_{10}L_{in}) \tan^2 k_0 \frac{l}{2} \quad (3)$$

同理,可以求出 TE_{10} 模对总的输入电抗:

$$X_{in} = \frac{Z_0}{ab\beta_{10}} \sin(2\beta_{10}L_{in}) \tan^2 k_0 \frac{l}{2} \quad (4)$$

式中: $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$; β_{10} 为传播常数。

由上式结果可以看出: R_{in}, X_{in} 的值随着参数 L_{in} 和 l 的变化而变化。通过调整 R_{in} 使其等于微带线的特征阻抗,并且通过适当的电抗调谐 X_{in} 以抵消波导激励高次模的电抗,达到最佳的能量耦合效率。

仿真时,微带探针的输入阻抗与探针宽度、长度、探针距离波导短路面的距离以及频率都有关。该结构中,探针插入波导宽边的位置距离波导段路面的长度 L_{in} 理论上应该为 $\lambda/4$,使得探针处于波导内场强最强的位置,利于波导探针紧耦合。开窗大小也是影响过渡性能的关键因素,将能量约束在微带线上,开窗尺寸应尽可能小,以抑制波导内传输的高次模的影响,同时又不能破坏微带线准 TEM 模式的场结构。在探针与微带之间使用了一段高阻线抵消微

带探针与波导缝隙间的耦合电容,并改善探针与标准 50Ω 微带线之间的阻抗匹配。

2.2 改进型 E 面 T 型结功分器

本文所使用的功分器是在波导 E-T 结功分器的基础上改进的,波导 E-T 结和 H-T 结功分器是常用的波导功分器,具有体积小、频带宽、插入损耗小以及易加工等优点,但是缺点是两端口功分时隔离度低^[13]。在文献[14]中,使用了 H-T 结来合成功率,最后总体达到 92% 的功率合成效率。本文为了使用 E 面探针插入波导宽边,采用 E-T 结的形式,使用 6 层硅片堆叠成腔。本文中设计的 E-T 结如图 3 所示,其等效电路如图 4 所示,轴线平行于主波导的 TE_{10} 模的电场方向,为一种串联分支^[15]。

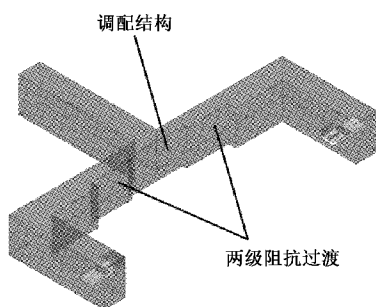


图 3 E 面 T 型结波导空间功率合成器结构

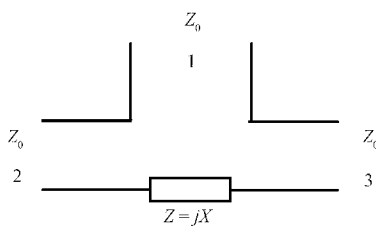


图 4 E 面 T 型结波导空间功率合成器结构

如图 4 所示,信号在端口 1 激励的时候,端口 2 和 3 等幅反向输出;信号在端口 2 和 3 同时反相激励的时候,功率合成后的信号在端口 1 输出;信号在端口 2 和 3 同时同向激励的时候,端口 1 无输出。E-T 结的 S 参数为:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由等效电路可知,波导宽边的不连续性造成了一个串联电抗,因此后面可以加入一个相反特性的电抗元件加以补偿;而本文采用一个容性台阶以及实现电抗抵消变换的两级渐变结构来实现隔离以及增大工作带宽的功能。

3 仿真与结果分析

为了验证本文设计的波导空间功率合成器的有效性与

可靠性,在上述理论分析的基础上利用三维电磁软件 HFSS 进行建模仿真。

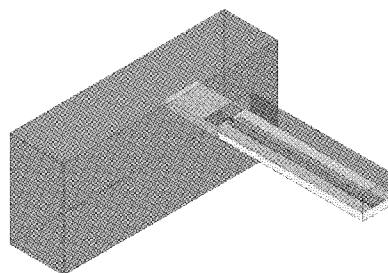
3.1 2 路波导-微带探针过渡

波导-微带探针的结构仿真模型如图 5(a)所示,首先通过调整耦合腔的高度与宽度进行仿真可得中心频率为 93 GHz 处的标准微带的宽度为 0.11 mm。仿真时信号由减高矩形波导输入,通过 E 面探针过渡到标准 50Ω 微带线,在探针与微带之间加入一段高阻线,置于波导内,充分利用波导空间。介质基片选用相对介电常数为 3.82,厚度为 0.127 mm 的石英玻璃,印制金属探针厚度为 0.017 mm。其他关键尺寸参数如表 1 所示。

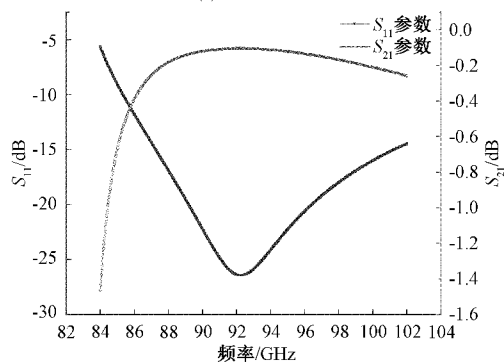
表 1 波导-微带过渡结构尺寸参数 mm

参数	尺寸	参数	尺寸
a	1.8	WG	0.03
b	1	WM	0.11
LP	0.22	WS	0.6
WP	0.5	L_{in}	0.81
LG	0.085		

从图 5(b)中仿真结果可以看出,在 89~97 GHz 频率范围内,回波损耗低于 -21 dB,插入损耗优于 -0.13 dB,考虑到实际加工误差,因此仿真时通过优化拓展了工作带宽。



(a) 3-D 模型图



(b) 仿真 S 参数

图 5 波导-微带过渡结构

在仿真过程中总结了几点规律,可以用来指导以后波导-微带过渡结构的设计工作:1) 探针的宽度影响波导-微带过渡的带宽性能;2) 探针的长度、插入点到波导短路面的

距离影响波导-微带过渡的中心频率;3)耦合腔的高度、宽度影响工作频带内的谐振;4)高阻线的长度与宽度在阻抗匹配时比较敏感,需要重点优化;5)波导减高时高度在大于截止值的基础上不宜过小,否则工作频带低频处容易出现谐振。

3.2 E-T 结功率分配器

依据上节的理论,在 HFSS 中建立 E-T 结功率分配器模型,如图 3 所示,仿真时信号由左端波导口输入,经过 E-T 结等分之后采用两路波导-微带探针过渡结构将转换至微带线上,仿真由单片微波集成电路(MMIC)看进去的 S 参数,结果如图 6 所示。

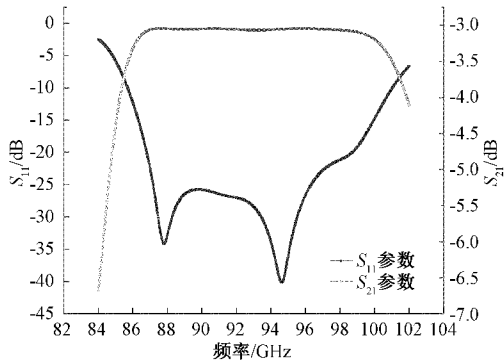


图6 E-T 结功率分配结构仿真 S 参数

由仿真结果可以看出,在 86.81~98.71 GHz 频率范围内,回波损耗低于-25.77 dB,插入损耗优于-3.04 dB。仿真结果可以判断,该改进型 E-T 结功分器具有很好的驻波特性和传输特性,并且与波导-微带探针取得了很好的阻抗匹配。

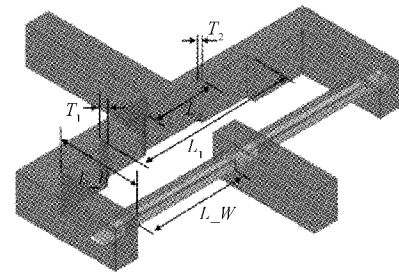
3.3 功率合成器整体仿真

在上述基础上,对空间功率合成器整体进行建模仿真,如图 7(a)所示,该结构中信号右侧波导口输入,经过两路微带探针将能量耦合至 E-T 结两臂,再经过功率合成、输出。模型具体结构参数如表 2 所示。

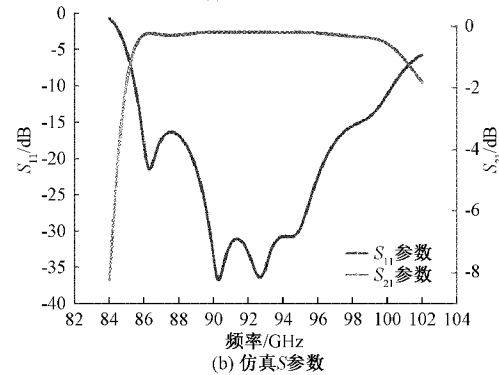
表 2 空间功率合成器尺寸参数 mm

参数	尺寸	参数	尺寸
a	1.8	L_1	0.39
b	1.1	T_1	7.2
h_1	0.017	L_2	2.8
h_2	0.127	T_2	0.19
L_W	5.4	L_B	3.8

由上图仿真结果可以看出,在 88.78~96.44 GHz 频率范围内,整体回波损耗低于-22.5 dB,插入损耗优于-0.22 dB,在 90~96 GHz 的工作频带内具有高达 95% 的合成效率。仿真结果证明该空间功率合成器的设计的有效性。



(a) 模型图



(b) 仿真 S 参数

图7 功率合成器整体仿真结构

4 结 论

本文通过实验验证了提出的 W 频段波导空间功率合成器设计方案的可行性,与现有设计相比具有更高的效率,满足 W 频段高效率、小型化、易于集成的要求,在小尺寸平台上的应用具有优越性。同时结合现有的工艺,基于硅材料,可以使用目前较为成熟的 MEMS 工艺和晶圆键合三维堆叠技术完成功率合成器的制作,能极大地提升加工精度。能广泛应用于 W 频段雷达、通信等领域。同时在需要大功率输出的微波系统和工程应用场景中也具有重要作用和意义。

参考文献

- [1] GOMEZ T A, SHAH U, OBERHAMMER J. Compact silicon-micromachined wideband 220~330 GHz turnstile orthomode transducer [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 9(1): 38-46.
- [2] 李霆,孟祥新,张华坤,等. W 波段主动式近场成像试验研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19): 22-26.
- [3] LEGGIERI A, ORENGO G, PASSI D, et al. The squarax spatial power combiner [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2013, 45: 43-55.
- [4] VELAZCO J, SAMOSKA L, TAYLOR M, et al. Spatial power combiner using cavity modes in W-band[C]. 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) IEEE, 2019: 991-994.
- [5] SAMOSKA L A, TAYLOR M, VELAZCO J, et al. A W-band spatial power-combining amplifier using

- GaN MMICs [C]. 2018 15th European Radar Conference(EuRAD), IEEE, 2018: 329-332.
- [6] LI X, CHEN G, ZHAN M, et al. A new planar compatible power combiner based on radial waveguide[C]. 2014 IEEE International Conference on Communication Problem-solving, IEEE, 2014: 147-149.
- [7] WANG S, LU S, YAO Z, et al. The design and implementation of solid-state power amplifier based on spatial power combiner for X-band vertical pointing radar [C]. 2019 International Conference on Meteorology Observations(ICMO), IEEE, 2019: 1-4.
- [8] ZHAI G, SHI B. Compact low loss millimeter wave 8-way radial waveguide power combiner[C]. TENCON 2017-2017 IEEE Region 10 Conference, IEEE, 2017: 1598-1601.
- [9] ABDOLAH M, POURGHOLAMHOSSEIN Z, SABAH M M, et al. A new six-way broadband spatial power combiner/divider based on conical cavity [C]. 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring(PIERS), IEEE, 2017: 1260-1262.
- [10] ALONSODEL P M, RECK T, JUNG K C, et al. Development of silicon micromachined microlens antennas at 1.9 THz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 7(2): 191-198.
- [11] SHIH Y C, TON T N, BUI L Q. Waveguide-to-microstrip transitions for millimeter-wave applications [C]. 1988, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IEEE, 1988: 473-475.
- [12] TIKHOV Y, MOON J W, KIM Y J, et al. Refined characterization of E-plane waveguide to microstrip transition for millimeter-wave applications [C]. 2000 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (Cat. No. 00TH8522), IEEE, 2000: 1187-1190.
- [13] 王斌, 田兵, 汪春霆. 基于薄膜电阻的波导 ET 结功率分配/合成器[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(1): 114-119.
- [14] CHENG H, HOU F, GUO J, et al. MEMS chip with amplifier for 4-W power combining up to 100 GHz[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(5): 779-785.
- [15] ZHAO C X, XIE X Q, XUE R M. Study on a 10w millimeter-wave power amplifier based on spatial combination structure [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(6):433-436.

作者简介

于士同, 硕士研究生, 主要研究方向为微波功率合成设计、高频微波电路。

E-mail: yst@mail.nwpu.edu.cn

邢小明, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为雷达频率综合器、接收机分系统设计。

E-mail: 2418027173@qq.com

夏侯海, 高级工程师, 主要研究方向为雷达收发组件等技术。

E-mail: Little_yst@outlook.com