

# 基于键合金丝补偿的太赫兹瓦级功率合成技术研究

朱翔<sup>1,2</sup>, 张俊杰<sup>3</sup>, 成海峰<sup>2</sup>, 郭健<sup>3\*</sup>, 施永荣<sup>1\*</sup>, 王维波<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室, 江苏南京 211106;

2. 南京电子器件研究所, 江苏南京 210016;

3. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要:** 针对太赫兹波段固态大功率应用需求, 基于氮化镓功率放大器单片集成电路 (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC), 采用功率合成技术实现了太赫兹波段瓦级功率输出。通过太赫兹波段微带/波导转换结构和键合金丝补偿技术, 结合 E 面 T 型结二路合成功率分配/合成器, 将两片 MMIC 封装成最大输出功率为 160 mW 的功率单元模块。在此基础上, 采用八路 E 面合成器设计了频率覆盖 180~238 GHz 的十六路功率合成放大器。在漏极电压为 +10 V 时, 带内输出功率大于 300 mW, 189 GHz 输出功率达到了 1.03 W。

**关键词:** 太赫兹; 金丝补偿; 氮化镓; 功率分配/合成器

中图分类号: TN722.75 文献标识码: A

## Research on watt-level power combining technology at terahertz band based on bonding wire compensation

ZHU Xiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun-Jie<sup>3</sup>, CHENG Hai-Feng<sup>2</sup>, GUO Jian<sup>3\*</sup>, SHI Yong-Rong<sup>1\*</sup>, WANG Wei-Bo<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

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

3. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With the application demands of solid-state high power in the terahertz (THz) band, a THz-band watt-level power output is achieved by adopting GaN power amplifier (PA) MMIC and power combining technology. Microstrip-waveguide transition, and the low-loss interconnection based on the gold wire compensation are used to package a PA module composed of two PA MMICs and an E-plane T-junction two-way power splitter/combiner. Maximum output power of 160 mW is achieved. Based on the module and an eight-way E-plane combiner, a sixteen-way power combining amplifier is designed across the frequency range of 180 to 238 GHz. Output power of more than 300 mW is achieved with +10 V drain voltage, and the maximum power is 1.03 W at 189 GHz.

**Key words:** THz, gold wire compensation, GaN, power splitter/combiner

## 引言

太赫兹频段具有频谱范围宽、信息容量大、分辨率高、抗干扰性好等特点, 当前在安检、成像、医疗等领域都有着巨大的应用前景<sup>[1]</sup>。在移动通信领域, 毫米波频段在 5G 移动通信中已实现商用, 太赫兹频段也是下一代无线通信的研究热点<sup>[2-4]</sup>。220

GHz (太赫兹波段) 作为大气窗口频段, 在精确制导、卫星通信等领域具有较高的应用前景, 受到了国内外研究机构的广泛关注。当前对于太赫兹波段的发射链路研究主要聚焦于倍频链方案, 输出功率通常较低, 一般在 10 mW 量级<sup>[5-7]</sup>; 而在实际的工程应用中, 为满足数千米的星间通信距离或者覆盖整个

收稿日期: 2022-11-10, 修回日期: 2023-01-10

Received date: 2022-11-10, revised date: 2023-01-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (NF2020003), 重点实验室基金 (612502200302)

Foundation items: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (NF2020003), key Laboratory Fund (612502200302)

作者简介 (Biography): 朱翔 (1989-), 男, 江苏人, 南京电子器件研究所高级工程师, 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; 朱翔与张俊杰对本文贡献相同. E-mail: ZhuXiangBS@Outlook.com

\* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: jguo@seu.edu.cn; yongrongshi@nuaa.edu.cn

广场的安检成像,需要瓦级以上的输出功率。然而受制于太赫兹频段固态器件的技术水平,太赫兹波段瓦级以上的功率输出只能采用电真空器件<sup>[8-10]</sup>。在太赫兹波段固态功率放大器方面,美国已经有基于InP HBT芯片开展功率合成的报道<sup>[11-12]</sup>,实现了最高输出功率820 mW<sup>[13-15]</sup>。此前国内虽然有少量太赫兹波段InP HBT和GaN HEMT的功放芯片研究报告<sup>[16-19]</sup>,但是芯片输出功率一般也在10 mW量级,而目前还没有该波段固态合成功放的报道,因此通过功率合成实现太赫兹波段大功率输出的需求迫在眉睫。

太赫兹波段功率合成放大器的关键技术包括高效率的器件封装以及合成网络技术。随着工作频率的升高,器件信号的有效传输是封装成功的关键,在太赫兹频段往往采用将微带/波导转换探针集成于MMIC片上的方式来降低封装损耗<sup>[20]</sup>,但这样不利于MMIC器件与其他平面器件的集成。在合成网络方面,波导二进制E面T型结合成器<sup>[21]</sup>是在波导合成网络中常用的一种结构,由于波导的短边尺寸和波导的特征阻抗成正比,而功率合成结构是并联模型。因此,传统的波导E面T型结合成器通常是将两个支路在短边尺寸减半,再合成为一个公共端。随着工作频率的增加,170~260 GHz的矩形波导为WR4标准波导,短边尺寸为0.55 mm,如果减半则为0.275 mm,局部的转变结构处尺寸将更小。因此,加工误差对于性能的影响会显著增加。

本文固态功放采用了南京电子器件研究所自主研制的太赫兹波段GaN功放MMIC。为实现低损耗的信号传输和合成,采用一种低通结构的金丝键合补偿电路来进行MMIC器件的封装,补偿键合金丝引入的不连续性。最终在180~238 GHz的频率范围内,采用过模波导十六路功率合成,实现了太赫兹波段瓦级峰值输出功率。

## 1 基于键合金丝补偿技术的低损耗互连

太赫兹波段功放模块采用矩形波导作为信号接口对功放芯片进行封装,因此需要微带探针实现微带至波导的转换以及键合金丝实现芯片与微带探针之间的互连。在频率达到200 GHz以上时,加工、装配误差以及键合金丝的寄生参量都会对封装效果产生较大的影响。本文中的微带-波导转换结构采用了E面微带探针转换,相比其他转换结构,其优点有插损小、带宽较宽、加工方便等。本文设计了频率覆盖170~260 GHz的微带探针电路,远超过

功放工作频段,从而适当补偿加工及装配误差带来的影响。此外,传统的金丝键合工艺参数引入的寄生参量较大,在太赫兹波段有较高的损耗,本文将键合金丝引入的寄生参量吸收到高截止频率的低通滤波器中,从而使其工作到260 GHz以上。下面分别对E面微带探针以及键合金丝补偿电路进行介绍。

E面微带探针将微带基板通过波导宽边壁伸入到波导内,基板正面的金属探针在波导腔内激励出TE<sub>10</sub>模,实现微带到波导的传输转换。

本文中微带的基板材料为50 μm厚度的石英,采用Ansys HFSS对该探针开展电磁仿真,该探针结构的仿真模型以及尺寸如图1所示。在50 Ω微带线和探针之间采用高阻抗线以实现微带线与波导之间的阻抗匹配。石英基板的宽度 $w_{s1}$ 为0.4 mm,微带至短路面的距离 $d$ 以及高阻抗线的长度 $l_{p2}$ 与工作频段相关。通过优化探针的尺寸,以获得最佳的回波损耗。

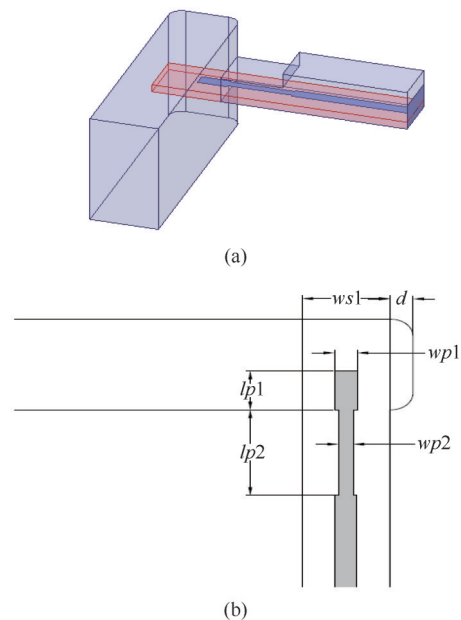


图1 太赫兹波段E面探针仿真结构,(a)三维模型,(b)关键尺寸

Fig. 1 THz-band E-plane probe simulation structure, (a) three-dimensional model, (b) key dimensions

最终根据仿真优化获得的关键尺寸为 $d=0.1$  mm,  $w_{p1}=0.1$  mm,  $w_{p2}=0.06$  mm,  $l_{p1}=0.23$  mm,  $l_{p2}=0.52$  mm。获得的最终仿真结果如图2所示,在170~260 GHz的工作频段内,回波损耗S<sub>11</sub>优于-18 dB。

金丝键合是MMIC芯片封装的必要工艺,实现

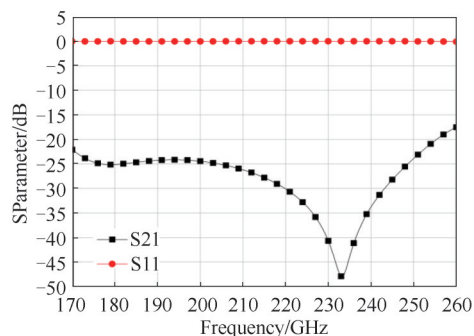


图2 太赫兹波段E面探针仿真结果

Fig. 2 THz-band E-plane probe simulation results

不同基片的微带线之间、微带线与芯片之间的互联。键合金丝的数量、长度、高度等参数都会对传输性能产生较大影响。在太赫兹频段,键合金丝的寄生电感效应较为明显,这会导致传输性能恶化,因此键合金丝的寄生电感补偿技术对于提高该频段电路的整体性能具有十分重要的意义。

金丝键合线可以等效成一个 $\pi$ 型集总网络,其等效电路如图3所示, $\pi$ 型网络中的电感 $L$ 表示键合金丝的寄生电感,而电容则表示微带线开路端的边缘电容,该寄生电容一般较小,可以忽略。寄生电感可以用式(1)来表示<sup>[22]</sup>。

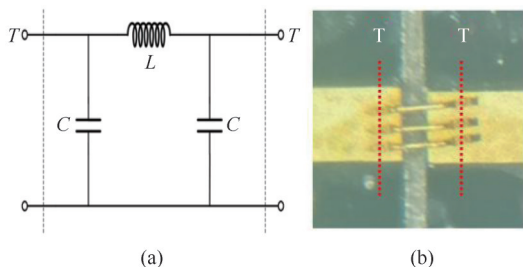


图3 金丝键合,(a)等效电路,(b)实物及端口示意

Fig. 3 Gold wire bonding, (a) equivalent circuit, (b) figure and port schematic

$$L = (\mu_0 l / 2\pi) \times \left[ \ln(4l/d) + \frac{1}{4} u_r \tanh(4d_s/d) - 1 \right] \quad (1)$$

其中, $L$ 即等效电感, $\mu_0$ 为空气介质磁导率, $\mu_r$ 为金丝的相对磁导率, $d_s$ 为金丝的趋肤深度, $l$ 为金丝的长度, $d$ 为金丝的直径。

为了补偿键合金丝引入的不连续性,根据金丝互连线的寄生电感效应,设计了电感输入式的高低阻抗线低通滤波器来改善传输线与传输线之间的传输性能。低通滤波器将键合金丝的寄生电感吸收到滤波器的输入电感中,如下图4所示。

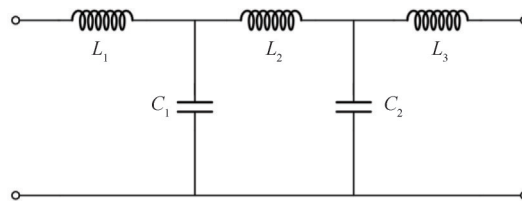


图4 金丝补偿的低通滤波器

Fig. 4 Low pass filter with gold wire compensation

为了使键合补偿结构能够工作到260 GHz,设计低通滤波器的截止频率约为300 GHz,通过低通网络原型计算出滤波器结构的初始尺寸后,再进行优化仿真即可得到低通滤波器最终尺寸。键合金丝采用单根25  $\mu\text{m}$  金丝,金丝拱高为100  $\mu\text{m}$ ,图5给出了吸收键合线不连续性的低通滤波补偿结构及仿真结果。

由图5仿真结果可以看出,加入低通滤波补偿结构对键合金丝进行补偿之后,插入损耗获得了一定的减小,带内的回波损耗得到了明显改善,全频带的S11均优于-15 dB,在大约200~250 GHz的频率范围内S11优于-20 dB,整体的S11最优值可达到约-30 dB。

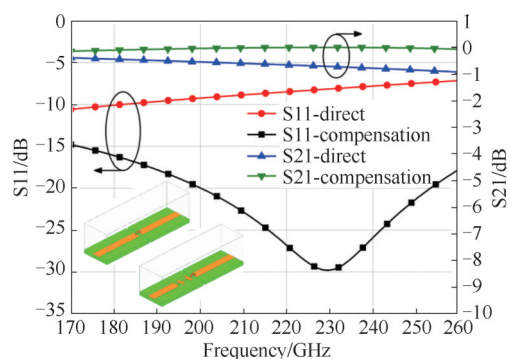


图5 采用补偿结构前后的S参数对比

Fig. 5 Comparison of parameter S with and without compensation structure

考虑到加工和装配的误差,两块基片之间的缝隙宽度可能会大于或小于30  $\mu\text{m}$ ,需要对缝隙宽度的变化进行容差分析。对缝隙宽度进行参数扫描,仿真20  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$ 和40  $\mu\text{m}$ 缝隙宽度下的S参数,如图6所示,缝隙宽度为20  $\mu\text{m}$ 与30  $\mu\text{m}$ 时,全频段S11均优于-15 dB,当缝隙宽度为40  $\mu\text{m}$ 时,整体的S11相较缝隙宽度20  $\mu\text{m}$ 和30  $\mu\text{m}$ 时有较大差距,但结果也优于-12 dB。

图7为该金丝补偿结构的实物测试结果,测试结构采用了背靠背的形式,包含了上文中仿真的波



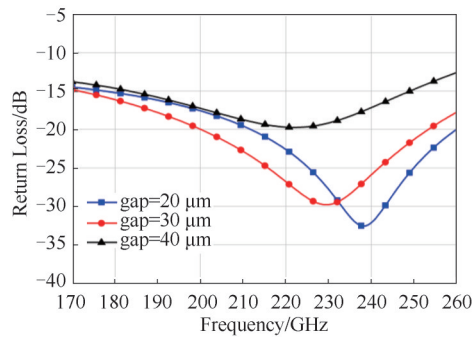


图6 不同缝隙宽度对应的S参数

Fig. 6 Parameter S corresponding to different gap widths

导探针转换,其中一边的探针采用了金丝补偿结构。从测试可以看到,测试结果与图5的仿真结果表现出较好的一致性,在大约170~255 GHz的频率范围内插入损耗S21均优于-2.5 dB。单个E面微带探针波导转换及键合金丝引入的插入损耗小于1.25 dB,220 GHz处的损耗小于0.8 dB;带内S11典型值为-13 dB,因此单个转换结构的回波应优于背靠背测试结果,能够达到应用要求。

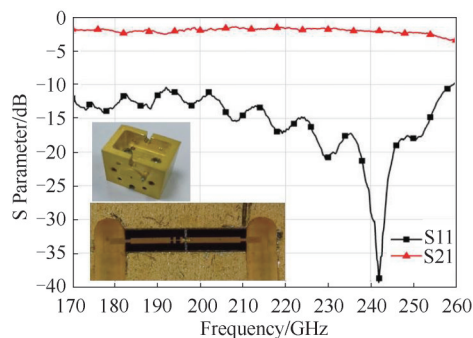


图7 采用金丝补偿的模块及测试结果

Fig. 7 Module with gold wire compensation and test results

## 2 过模波导E面T型结合器设计

针对上述对太赫兹信号和尺寸的特点分析,本文相应的提出一种过模形式的太赫兹波段波导T型结合成结构,其仿真模型如图8所示。该种合成器将两个标准波导口进行合成,合成以后的波导窄边被扩展为标准波导的两倍,再通过渐变结构变为标准波导口输出。该渐变结构一方面实现了阻抗匹配,另一方面也抑制了高次模的激励。

采用过模结构区别于传统E面T型结合成结构,无需对波导宽度进行减半实现阻抗匹配,整个结构中最小的加工尺寸即标准波导尺寸。这种设计方式在太赫兹频段可以降低加工难度,更好地保障性能。

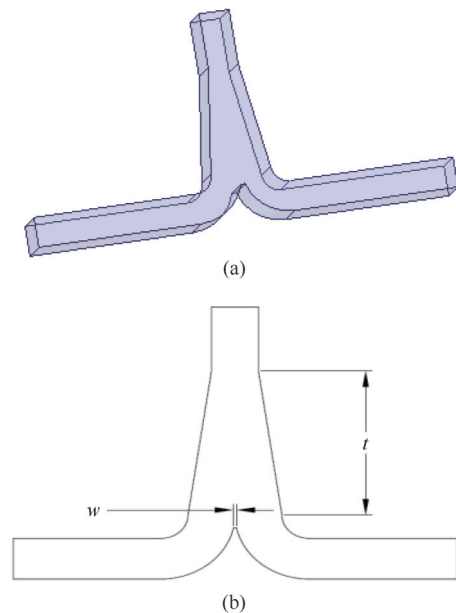


图8 太赫兹波段过模波导E面T型结合成器,(a)仿真模型,(b)剖面图

Fig. 8 THz-band overmoded waveguide E-plane T-junction combiner, (a) simulation model, (b) section

该仿真模型的关键尺寸已在图上标出,通过优化渐变长度尺寸 $t$ 和切角宽度 $w$ 的尺寸以获得最佳的公共端回波损耗。最终优化获得的尺寸为 $w=0.07\text{ mm}$ , $t=1.93\text{ mm}$ ,最终获得的仿真结果如图9所示。仿真结果显示,在170~260 GHz的工作频段内,S11优于-20 dB。

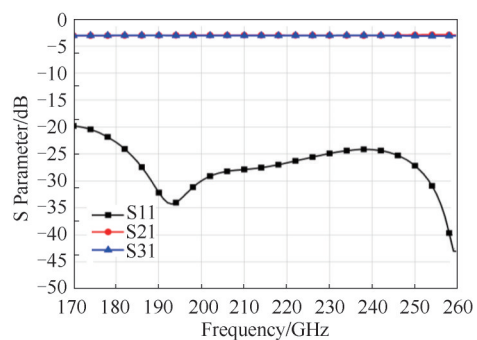


图9 太赫兹波段过模波导E面T型结合成器仿真结果

Fig. 9 Simulation results of THz-band overmoded waveguide E-plane T-junction combiner

以此E面T型结为基础,开发出一种4路功率合成器,其仿真模型如图10(a)所示,4个分支波导通过对称布局的方式使得4个端口能够保持较好的幅相一致性。太赫兹波段频率高、波长短,因此,波导的传输损耗已经不可忽略。在仿真时,为了获得更加真实的仿真数据,将波导腔体结构的表面金属设

置为金,电导率为 $4.1 \times 10^7 \text{ S/m}$ ,金属加工表面的粗糙度为 $0.8 \mu\text{m}$ 。图10(b)为该合成器的实物照片,所有的输入输出端口都采用了标准波导法兰。

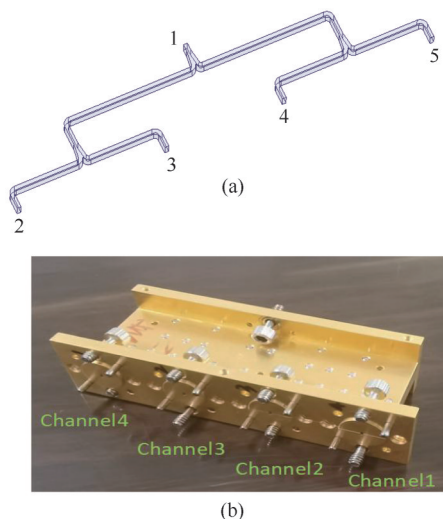


图10 太赫兹波段E面四路波导合成器,(a)仿真模型,(b)实物

Fig. 10 Model of THz-band E-plane four-way waveguide combiner, (a) simulation model, (b) figure

对该4路功率合成器的S参数进行无源测试,图11(a)为实测数据和仿真数据的对比图。在170~260 GHz的工作频段内,带内S11的仿真数据和实测数据皆优于-15 dB,带内S21~S51的仿真数据和实测数据皆为-7 dB左右,因此,单通道的传输损耗约为1 dB,等效合成效率为79.4%。仿真数据和实测数据吻合度较好。

图11(b)展现了四个通道实测的相位一致性,在170~260 GHz的频率范围内,相位一致性为 $\pm 15^\circ$ 。

### 3 功率单元模块实现

在上述金丝补偿互联结构和过模波导E面T型结合成结构的基础上,继续开展了太赫兹波段功率单元模块的设计。

每个功率单元模块包含两只GaN功放MMIC,模块的输入输出采用相同的微带-波导转换以及过模波导T型结合成结构,并设置了2个功放芯片的安装腔体,如图12所示。模块为了保证功放芯片的良好散热,整个模块皆采用金属形式。芯片安装腔体的上下两层皆为金属平面,为了保证模块的可靠性,因此需要抑制腔体的平行板波导模式。

平板波导TEM模式的截止频率可以由下式(2)

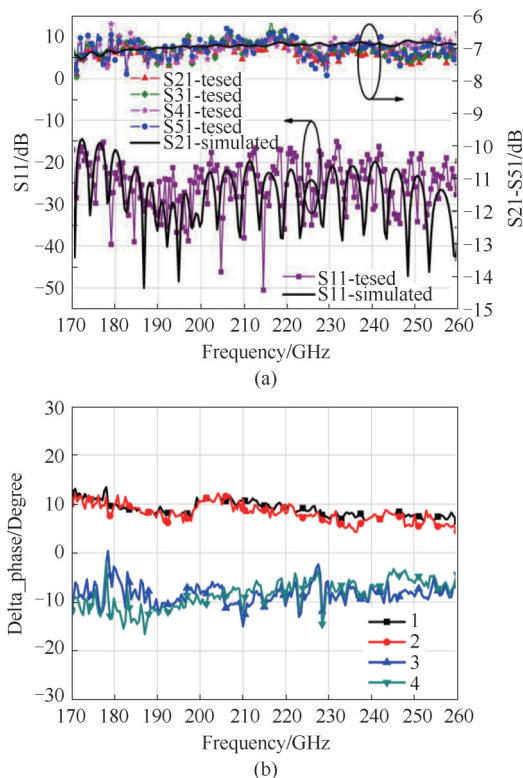


图11 太赫兹波段E面四路波导合成器,(a)插入损耗和回波损耗,(b)相位一致性

Fig. 11 THz-band E-plane four-way waveguide combiner, (a) insertion and return losses, (b) phase consistency

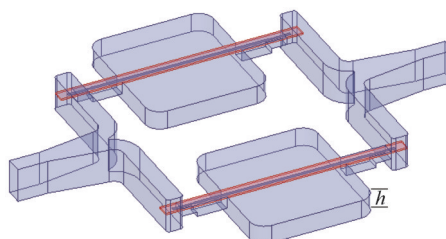


图12 功率单元模块内部腔体仿真模型

Fig. 12 Simulation model of internal cavity of unit power module

计算:

$$f_c = \frac{1}{2h\sqrt{\mu\epsilon}} \quad , \quad (2)$$

其中, $h$ 为芯片安装腔体的高度。

以截止频率 $f_c=250 \text{ GHz}$ 计算,得到 $h=0.6 \text{ mm}$ ,因此将腔体高度设置为 $0.6 \text{ mm}$ 。仿真模型设置腔体表面金属为金,加工表面粗糙度为 $0.8 \mu\text{m}$ 。

图13为该模型的仿真结果,可以看到在180~240 GHz的频率范围内S11总体上优于-20 dB,S21总体上优于-1.6 dB。

对功率单元模块进行加工制作,模块中采用的

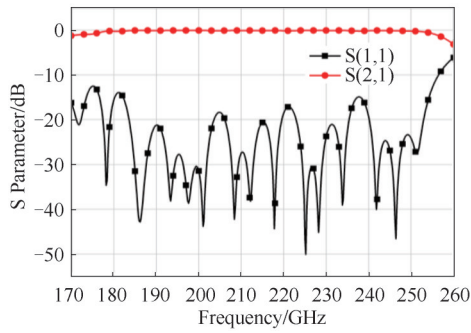


图 13 功率单元模块直通仿真结果

Fig. 13 Unit power module pass-through simulation results

功率芯片为南京电子器件研究所自主研制的太赫兹波段 GaN 功放芯片。图 14 为该模块的实物照片, 该模块的外形尺寸为  $19\text{ mm} \times 19\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ , 以标准矩形波导法兰为输入输出端口。

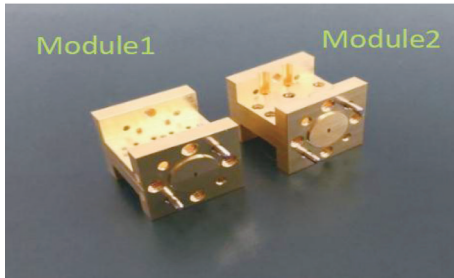


图 14 太赫兹波段功率单元模块

Fig. 14 THz-band power amplifier unit module

图 15 展示了太赫兹波段功率单元模块的功率实测数据, 测试条件为漏极电压  $+10\text{ V}$ , 栅极电压  $-0.3\text{ V}$ 。在连续波的工作条件下, 经实测在  $180 \sim 238\text{ GHz}$  的频率范围内, 输出功率大于  $60\text{ mW}$ , 增益大于  $8\text{ dB}$ , 带内最高功率约为  $160\text{ mW}$  左右。

#### 4 太赫兹波段 1 W 合成功放实现与测试

根据上文中设计的过模波导 E 面 T 型结合器

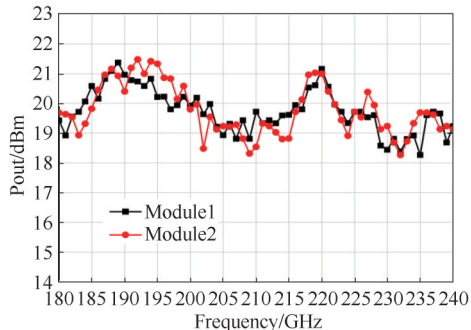


图 15 太赫兹波段功放单元模块测试结果

Fig. 15 THz-band amplifier unit module test results

开展进一步的功率合成, 依次采用 4 路合成器、2 路合成器将 8 只功率单元模块进行功率合成。16 路合成功率放大器装配后的照片如图 16 所示。每个单元模块的顶部安装了一块偏置电源板, 以实现电源去耦和纹波控制; 并且增加了前级激励模块, 采用 1 只功率单元模块推动 4 只功率单元模块。

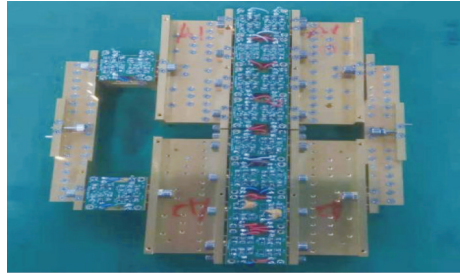


图 16 16 路合成功率放大器实物照片

Fig. 16 Photo of sixteen-way power combining amplifier

图 17 为该合成功放的实测数据, 在漏压  $+10\text{ V}$ , 输入功率  $0\text{ dBm}$ , 连续波测试的工作条件下, 输出功率的最高频点在  $189\text{ GHz}$  处, 输出功率达到了  $1.03\text{ W}$ , 同时在  $216\text{ GHz}$ 、 $237\text{ GHz}$  等频率处, 输出功率都超过了  $700\text{ mW}$ 。

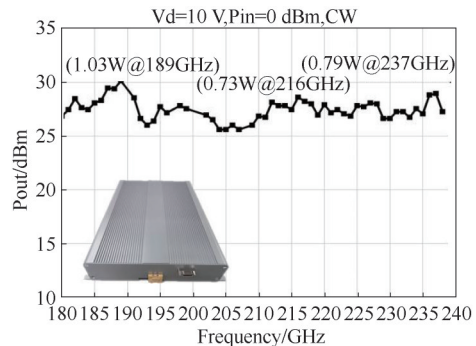


图 17 太赫兹波段固态功放测试结果

Fig. 17 Test results of THz-band solid-state power amplifier

将上述单元模块的典型输出功率和总的输出功率对比计算, 获得的合成效率曲线如图 18 所示, 平均合成效率约为  $60\%$  左右, 但是在带内合成效率差别非常大。分析原因, 考虑一方面是因为合成采用了 16 路 E 面 T 型结, 该合成结构并非平衡式的合成器, 因此后续合成器的驻波以及传输距离会对功放芯片的输出阻抗形成牵引。安装合成器以后, 功放芯片的输出功率和测试单元模块时会有较大区别。

同时, 根据上文合成器的测试曲线, 在工作频带内具有一定的波动性, 因此对于合成效率也会造



成一定的波动。

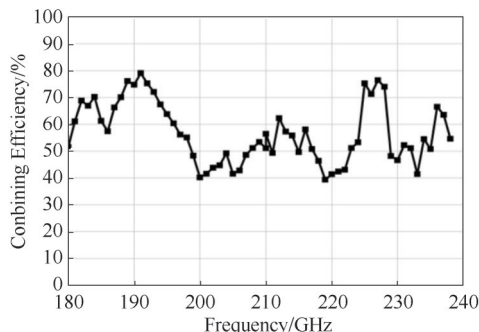


图18 太赫兹波段固态功放合成效率曲线

Fig. 18 Combining efficiency curve of THz-band solid-state power amplifier

表1给出了本文设计的太赫兹波段合成功放与同频段相关工作的性能对比。目前国内外太赫兹波段固态合成技术仍处于起步阶段,仅有美国报道过3篇太赫兹波段的功率合成结果,相比国外目前已经公开的研究结果,本文设计的太赫兹波段固态合成功放的典型输出功率已经达到1 W以上,明显优于所有国外报告的测试指标。与文献[13]及[15]相比,本文设计的功放工作带宽更宽。与文献[14]相比,本文设计的功放合成路数更少。而对比国外3篇文章的典型合成效率,本文仍有一定的优势。同时,对比国外文献使用的芯片均采用InP HBT工艺,本文使用的芯片则是采用了自主研发的GaN HEMT工艺。

## 5 结论

本文主要开展了太赫兹波段固态功率合成的研究。在自主GaN功率芯片的基础上开展了16路

功率合成,在工作频带内最高获得了1 W以上的输出功率。为了匹配太赫兹波段的信号传输,提出了一种基于金丝补偿技术的太赫兹低损耗传输技术,实现对于金丝键合引入的不连续性的补偿。同时,以E面T型结为基础开发了8路波导合成器。以单元模块为基础,通过8路E面波导合成器进一步合成,实现了太赫兹波段固态合成功放的样机。经测试,该样机在189 GHz获得了1.03 W的输出功率。

本章节开展的太赫兹波段功率合成技术研究,在一定程度上弥补了国内在太赫兹波段功率合成领域的研究空白,开拓了太赫兹大功率装备的发展前景,可以推进太赫兹星间通信的技术发展。

## References

- [1] Wang Jia-Ying, Zhang Mian-Chen, Zhou Si-Yuan, *et al.* Development and application of terahertz radar technology [J]. *Journal of China Academy of Electronic Sciences.* (王佳颖,张铎宸,周思远,等.太赫兹雷达技术发展与应用. *中国电子科学研究院学报*)2021, **16**(08):844-850.
- [2] Al-Ogaili F, Shubair R M. Millimeter-wave mobile communications for 5G: Challenges and opportunities [C]. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016:1003-1004.
- [3] Rappaport T S, Xing Y, Kanhere O, *et al.* Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond [J]. *IEEE Access*, 2019, **7**:78729 - 78757.
- [4] Hwu S U, deSilva K B, Jih C T. Terahertz (THz) wireless systems for space applications [C]. *IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, 2013: 171-175.
- [5] Siles J V, Maestrini A, Alderman B, *et al.* A Single-Waveguide In-Phase Power-Combined Frequency Doubler at 190 GHz [J]. *IEEE Microwave and wireless components letters*, 2011, 1-3.
- [6] Meng Jin, Zhang De-Hai, Jiang Chang-Hong, *et al.* Development of 166 GHz high power source based on power synthesis technology [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孟进,张

表1 本文研制的太赫兹波段固态功率放大器与国外报道结果对比

Table 1 Comparison of THz-band solid-state power amplifier developed in this paper and foreign reported results

对比	频率(GHz)	典型输出功率	工艺特点	合成路数	典型合成效率
本论文	180-238	1.03 W@189 GHz	GaN HEMT	16-way	76.1%@189 GHz
		730 mW@216 GHz			58.1%@216 GHz
		790 mW@237 GHz			63.5%@237 GHz
[13]	200-240	450 mW@205 GHz	InP HBT	16-way	50%@215 GHz
		350 mW@225 GHz			43.7%@225 GHz
[14]	200-260	710 mW@230 GHz	InP HBT	32-way	35.3%@233 GHz
		580 mW@200 GHz			36.9%@230 GHz
[15]	200-230	820 mW@216 GHz	InP HBT	16-way	51%@216 GHz
		680mW@225 GHz			
		380 mW@230 GHz			

- 德海,蒋长宏,等.基于功率合成技术的166 GHz大功率源研制. *红外与毫米波学报* 2018, **37**(05):608-612.
- [7] Yao Chang-Fei, Zhou Ming, Luo Yun-Sheng, *et al.* Development of D-Band and G-Band frequency multiply sources with Schottky diodes of NEDI[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (姚常飞,周明,罗运生,等.基于NEDI砷化镓肖特基二极管的D波段和G波段倍频源. *红外与毫米波学报*) 2014, **33**(03):256-262.
- [8] Paoloni C, Mineo M. Double Corrugated Waveguide for G-band Traveling Wave Tubes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, **61**(12):4259-4263.
- [9] Pan P, Hu Y, Gao M, *et al.* Progress of G band folded waveguide TWT[C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2015.
- [10] Chang Shao-Jie, Wu Zhen-Hua, Huang Jie, *et al.* The research progress of vacuum electron device in terahertz band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (常少杰,吴振华,黄杰,等.真空电子太赫兹器件研究进展. *红外与毫米波学报*) 2022, **33**(03):25-256-261.
- [11] Radisic V, Scott D W, Cavus A, *et al.* 220-GHz high-Efficiency InP HBT Power Amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, **62**(12):3001-3005.
- [12] Radisic V, Scott D W, Monier C. 50 mW 220 GHz InP HBT power amplifier MMIC [C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2014.
- [13] Kazemi H, Miller D, Mohan A, *et al.* 350 mW G-band medium power amplifier fabricated through a new method of 3D-copper additive manufacturing[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2015.
- [14] Gritters D, Brown K, Ko E. 200-260 GHz solid state amplifier with 700 mW of output power[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2015.
- [15] Rollin J-M, Miller D, Urteaga M, *et al.* A Polystyrene® 820 mW G-band Solid State Power Amplifier [C]. 2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), 2015.
- [16] Guo Fang-Jing, Wang Wei-Bo, Chen Zhong-Fei, *et al.* Research progress of terahertz solid state amplifier[J]. *Application of Electronic Technique*. (郭方金,王维波,陈忠飞,等.太赫兹固态放大器研究进展. *电子技术应用*) 2022, **33**(03):256-261.
- [17] Zhang Zheng, Jiao Fang, Wu Shao-Bing, *et al.* G-band amplifier based on 50 nm AlN/GaN heterojunction[J]. *Research & Progress of SSE*. (张政,焦芳,吴少兵,等.基于50 nm AlN/GaN异质结的G波段放大器. *固体电子学研究进展*) 2018, **34**(S1):263-265.
- [18] Sun Yan, Cheng Wei, Lu Hai-Yan, *et al.* A 300 GHz InP DHBT Amplifier MMIC [J]. *Research & Progress of SSE*. (孙岩,程伟,陆海燕,等.300 GHz InP DHBT单片集成放大器. *固体电子学研究进展*) 2022, **33**(03):256-261.
- [19] Chen Yan, Meng Fan-Zhong, Fang Yuan, *et al.* Design of 220 GHz power amplifier based on 90 nm InP HEMT Process [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈艳,孟范忠,方园,等.基于90 nm InP HEMT工艺的220 GHz功率放大器设计. *红外与毫米波学报*) 2022, **41**(06):1037-1041.
- [20] Gunnarsson S. E, Wadefalk N, Svedin J, *et al.* A 220 GHz Single-Chip Receiver MMIC With Integrated Antenna [J]. *IEEE Microwave and wireless components letters*, 2008, 284-286.
- [21] Chao Hai Du, Tsun-Hsu Chang, Pu Kun Liu, *et al.* Design of a W-band Gyro-TWT Amplifier With a Lossy Ceramic-Loaded Circuit [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, **60**(7):2388-2394.
- [22] Yan Wei, Fu Peng, Hong Wei, *et al.* Microwave characteristics of bonding interconnection in LTCC microwave multichip modules [J]. *Journal of Microwave*. (严伟,符鹏,洪伟,等. LTCC微波多芯片组件中键合互连的微波特性. *微波学报*) 2003(03):30-34.