

文章编号: 2095-4980(2023)11-1285-10

基于合成技术的毫米波太赫兹固态功放研究进展

杜佳谕, 成海峰*, 朱 翔, 郭方金, 王维波

(南京电子器件研究所, 江苏 南京 210016)

摘 要: 随着下一代通信和装备向着更大带宽和更高精确度的方向发展, 毫米波太赫兹频段成为微波技术研究的重点方向。发射功率是太赫兹系统中的关键指标, 功率的大小直接决定了系统的作用距离。近些年来, 毫米波太赫兹频段的固态功率器件取得了显著进步, 推动了国内外太赫兹固态功率放大器的工程实现。本文介绍了国际上毫米波太赫兹频段功率合成技术和固态功放的研究现状, 以及我国特别是南京电子器件研究所在 W 波段与 G 波段基于径向功率合成技术、矩形波导合成技术以及硅基波导合成技术的固态功放模组的最新研究进展。

关键词: W 波段; G 波段; 毫米波; 太赫兹; 功率合成; 固态功放

中图分类号: TN73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022245

Review of millimeter-wave terahertz solid-state power amplifiers with combining technology

DU Jiayu, CHENG Haifeng*, ZHU Xiang, GUO Fangjin, WANG Weibo

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: With the development of next-generation communications and equipment towards wider bandwidth and higher accuracy, millimeter wave and terahertz band has become the research focus of microwave technology. Transmit power is a significant figure of terahertz system, which directly determines the operating distance. Millimeter wave and terahertz solid-state power devices reveal great advances recently, and the engineering realization of terahertz solid-state power amplifiers at home and abroad is promoted. In this article, the international research status of millimeter wave terahertz power combining technology and solid-state power amplifier is introduced, and the latest research progresses of solid-state power amplifier modules based on radial combining, rectangular waveguide combining and silicon waveguide combining at W and G band in China, especially in Nanjing Electronic Devices Institute, are concluded.

Keywords: W-band; G-band; millimeter-wave; terahertz; power combining; solid state power amplifier

毫米波太赫兹频段相比微波频段具有频谱范围宽、信息容量大、分辨力高、抗干扰性好等优点, 对于高精度装备发展和下一代通信技术的发展具有重大意义^[1-2]。在毫米波太赫兹系统中, 发射功率是一个重要的指标, 直接影响探测、成像或通信的作用距离。目前成熟的大功率固态放大器已经可以覆盖至 Ka 波段^[3-4], 而 W 波段以及太赫兹频段, 国内固态功率放大器目前还处于刚起步阶段。

随着国内外化合物半导体技术的发展, 单个功率器件的输出功率目前在 W 波段达到了数瓦的量级^[5-8], 在 G 波段达到了数十毫瓦的量级^[9-10]。但单个固态器件的功率输出能力远达不到工程应用的需求, 因此近些年来国内外开展了毫米波太赫兹固态功率合成技术的研究, 并在 W 波段、G 波段等典型频段实现了大功率固态功率模组。本文介绍了国外 W 波段和 G 波段固态功率合成放大器的研究现状和南京电子器件研究所在 W 波段与 G 波段功率合成技术与固态功放模组的最新研究进展。

收稿日期: 2022-12-15; 修回日期: 2023-01-14

*通信作者: 成海峰 email:chenghay@outlook.com

1 国外毫米波太赫兹固态功率合成放大器研究现状

2010年前后,国外开始出现了基于 GaN HEMT(High Electron Mobility Transistor)工艺的 W 波段功放芯片研究报道。随后,关于 W 波段的功率合成的研究报道陆续发布。2014 年以后,国外出现了基于 InP HBT(Heterojunction Bipolar Transistors)的 G 波段功放芯片的研究报道,随后美国发布了多个 G 波段功率合成研究成果的报道。

美国 HRL(Hughes Research Laboratory)实验室 2012 年发布 W 波段 GaN 功率放大器芯片,实现在 93.5 GHz 处最大输出功率 2.138 W,效率为 19%;在 92~96 GHz 频段内,输出功率大于 1.5 W,效率大于 17.8%^[11]。

美国 Quinstar 公司 2015 年发布 W 波段 GaN 功率放大器芯片。采用美国 HRL 公司 0.1 μm GaN HEMT 工艺研制的 W 波段功放芯片,在 75~100 GHz 频率范围内,输出功率大于 2 W,最大输出 3.1 W^[6]。

2019 年,Teledyne 公司发布一款基于 InP HBT 的功放芯片,在 115~150 GHz 可获得超过 125 mW 的输出功率,在 140 GHz 处大信号增益 17.5 dB,功率附加效率(Power Added Efficiency, PAE)为 9.8%,可获得 153 mW 的最大输出^[12]。

Quinstar 公司还发布了多项功率合成的研究成果,2010 年将 12 路 400 mW 功放芯片进行合成,频率范围为 94~98 GHz,获得 5 W 的输出功率,合成效率为 87.5%^[13];2016 年该公司采用同样的 12 路径向合成结构和 2 路波导合成结构,将 24 个单片合成,获得 37 W 的输出功率,频率范围为 75~100 GHz,合成效率达到 84.5%^[14]。

2022 年,美国 Raytheon 公司提出一种 W 波段脉冲固态功率放大器,采用 128 路合成器合成 128 个高性能 GaN 功放芯片,在 92~96 GHz 频段内,实现在脉宽 30% 的脉冲输入下,输出功率大于 63 W,最大功率 79 W;在脉宽 0.1% 的脉冲输入下,最大输出功率能达到 100 W^[15],如图 1 所示。

由于 G 波段功率器件起步较晚,国内外报道较少。2014 年 NG 公司报道了一款 G 波段功率放大器,芯片采用 250 nm InP HBT 工艺,总的发射极面积为 18 μm^2 。放大器在 210~230 GHz 频段实现增益大约 5 dB,在 210 GHz 实现最大饱和输出功率 90 mW,PAE 为 10%^[16]。同年,美国 Teledyne 公司采用 0.25 μm InP HBT 工艺,实现了在 220 GHz 输出功率大于 200 mW 的功放芯片^[10]。

2019 年,德国斯图加特大学的 Benjamin Schoch 联合弗劳恩霍夫应用固体物理研究所提出一种基于 35 nm InGaAs 的宽带 H 波段功率放大器。在 264 GHz 处小信号增益 14.7 dB;在 280 GHz 处输出饱和最大功率 6.7 dBm^[17]。

2020 年,Teledyne 公司提出一种基于 250 nm InP 工艺的 G 波段功率放大器,在 160~185 GHz 频率范围内,饱和输出功率大于 177 mW,增益大于 12.2 dB,PAE 大于 5.4%;最大输出功率在 170 GHz 处为 244 mW,增益 14.1 dB,PAE 为 7.5%^[18]。

2022 年,Teledyne 公司基于 250 nm InP HBT 工艺,设计了一种 G 波段功率放大器。在 150~175 GHz 频段内,输出功率为 204~250 mW,增益大于 17 dB,PAE 为 13.1%~15.7%^[19]。

2015 年,美国 Raytheon 公司采用 70 mW 功放芯片实现了 32 路合成的功放模组,在 220 GHz 输出功率大于 700 mW^[20],如图 2 所示。同年,Teledyne 公司与 Nuvotronics 公司合作,基于 80 mW 芯片,制作了 16 路合成功放模组,在 216 GHz 实现了 820 mW 的输出功率^[21]。

2 国内毫米波太赫兹固态功放芯片研究进展

2016 年起,南京电子器件研究所陆续发布了多种 W 波段 GaN 功放芯片。基于自主 0.1 μm GaN HEMT 工艺,实现了 3 款功放芯片,如图 3 所示。3 款芯片工作频率范围为 92~96 GHz,最高输出功率分别为 30 dBm、34 dBm、36 dBm。功率增益分别为 9 dB、10 dB、11 dB。PAE 分别为 15%^[22]、14%^[23]、13%^[5]。

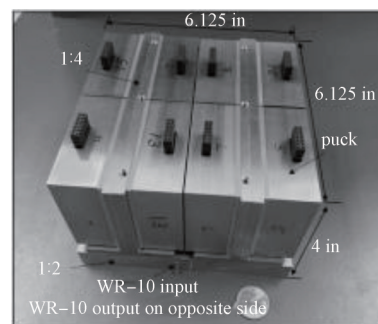


Fig.1 W-band 100 W synthesized solid-state power amplifier of Raytheon

图 1 Raytheon 公司 W 波段 100 W 合成固态功放

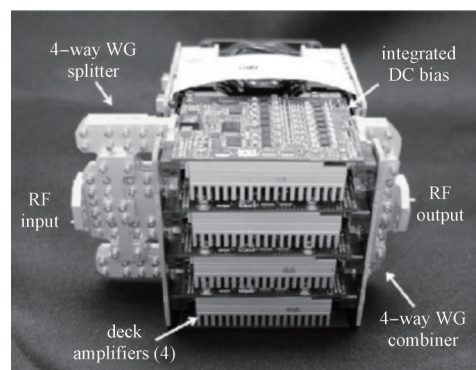


Fig.2 G-band 32-channel waveguide composite power amplifier of Raytheon

图 2 Raytheon 公司 G 波段 32 路波导合成功放

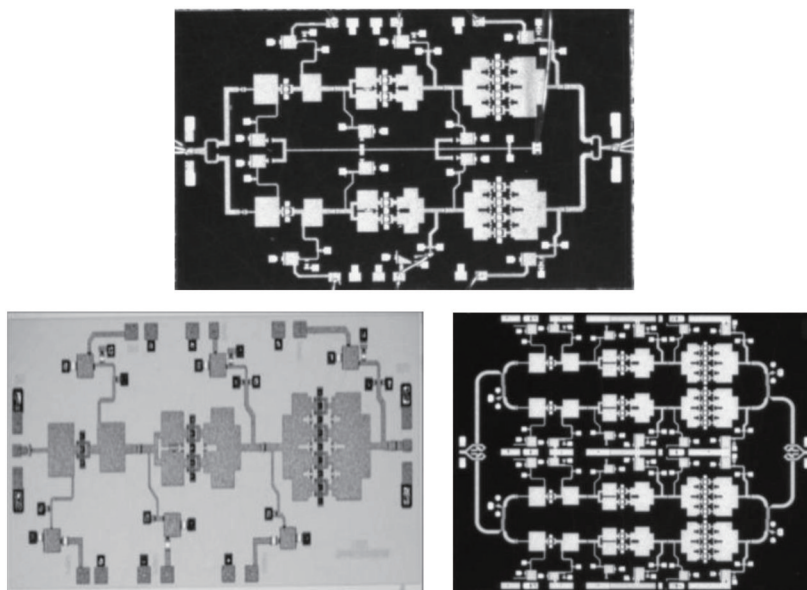


Fig.3 Three kinds of GaN power amplifier chips
图3 三款W波段GaN功放芯片

2020年,杭州电子科技大学提出一种基于GaAs的W波段功率放大器,在84~100 GHz频率范围内,平均小信号增益为15 dB,平均饱和输出功率为21.5 dBm(141 mW)。在工作频率为88 GHz时,可实现22.3 dBm(170 mW)的峰值饱和输出功率^[24]。

2021年,中国电子科技集团公司第十三研究所提出一种基于GaN HEMT的W波段单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)。测试结果表明,在漏源工作电压15 V,88~92 GHz频率范围内,该MMIC的线性增益大于15 dB,饱和输出功率大于3 W^[25]。

南京电子器件研究所采用50 nm GaN工艺研制的G波段功放芯片,如图4所示,实现了工作频率180 GHz以上,最大输出功率突破100 mW,最高功率密度大于1.3 W/mm。

2021年,清华大学设计了基于低损耗槽线功率梳理技术的高效宽带毫米波集成功率放大器,在161 GHz时可实现30.7 dB的峰值功率增益、40 GHz的3dB小信号增益带宽、18.1 dBm的最大饱和输出功率和12.4%的峰值PAE^[26]。

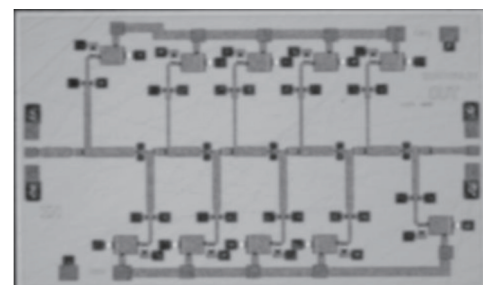


Fig.4 G-band power amplifier MMIC
图4 G波段GaN功率放大器MMIC

3 国内毫米波太赫兹功率合成技术研究进展

本节将主要介绍南京电子器件研究所在毫米波太赫兹频段固态功率合成技术及合成功放模组的一些最近研究进展,针对径向功率合成技术、矩形波导合成技术以及硅基波导功率合成技术进行介绍。

3.1 基于径向结构的功率合成技术

径向合成技术由于其一次性合成的特点,是一种常见的功率合成结构。传统的径向合成结构通常采用同轴结构激励,随着工作频率提高,同轴结构加工难度越来越高。南京电子器件研究所在毫米波太赫兹频段提出了几种结构简洁、易于加工的径向功率合成结构。

1) W波段TE₀₁模式圆波导径向合成

圆波导TE₀₁模的磁力线径向指向圆波导中心,当矩形波导由圆波导的侧壁进入时,能激励起圆波导的TE₀₁模式。围绕圆波导的侧壁插入多个矩形波导激励,可实现多路径向功分合路结构。南京电子器件研究所基于该原理,设计了一种W波段16路径向合成器。该合成器的公共端由圆波导TE₀₁模激励,16个支路为矩形波导TE₀₁模,相邻支路之间呈22.5°均匀布局,并设计了一种TE₀₁模式圆波导-矩形波导新型模式转换器。将该转换器与合成器连接,完成了矩形波导-矩形波导的径向合成结构,如图5(a)所示。该合成器的直径仅为42 mm,结构尺寸非常紧凑。测试结果如图5(b)所示,在85~105 GHz频带内,回波损耗优于10 dB,插损小于1.5 dB。因此,单边的插损为0.75 dB。将合成损耗进行对数转换,可得到单边带合成效率为84%。除去模式转换器的损耗,该结构

合成器的效率为 92%^[27]。

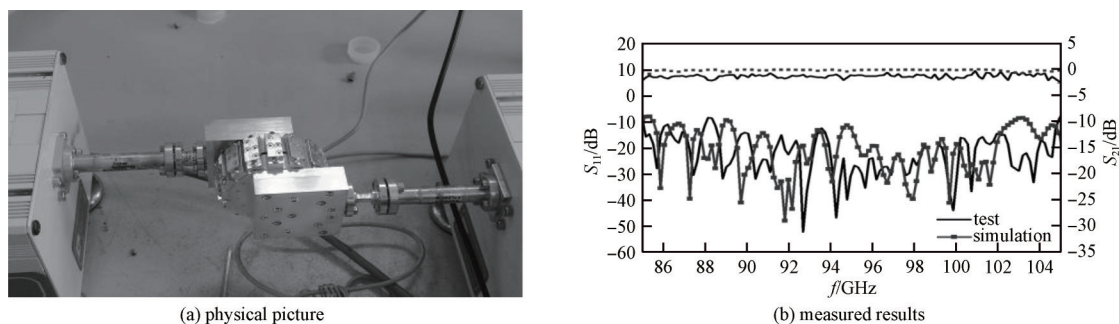


Fig.5 16-channel TE_{01} mode radial power combiner
图 5 16路 TE_{01} 模径向合成器

2) W 波段 TM_{01} 模式圆波导径向合成

南京电子器件研究所设计了一种 TM_{01} 模径向合成器，将圆波导置于径向波导中心，通过一个圆柱形台阶结构，激励出 TEM 模并实现阻抗匹配，使信号在径向波导内传播，并在波导外圈均匀地围绕 8 个矩形波导实现 8 路合成。同时设计了一种 TM_{01} 圆波导—矩形波导的模式转换器，将该模式转换器与 8 路径向合成器连接，完成标准波导—标准波导的径向合成结构。对该 8 路合成结构进行实测，实物如图 6(a)所示，合成器的实测结果如图 6(b)~(c)所示，在 90~101 GHz 的工作频带内，回波损耗优于 13 dB，带内平均插损为 2 dB。因此单边的插损为 1 dB，计算可得合成效率为 80%。

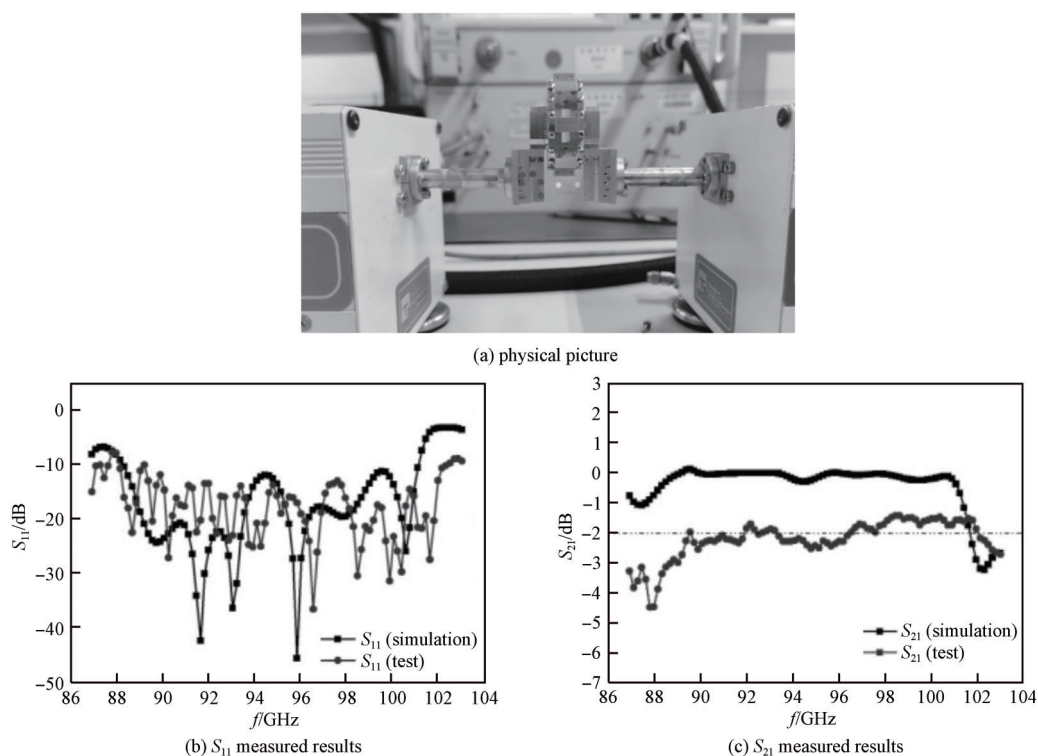
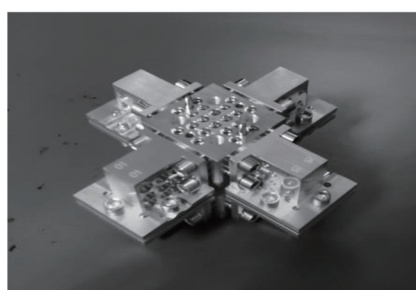


Fig.6 8-channel TM_{01} mode radial power combiner
图 6 8路 TM_{01} 径向合成器

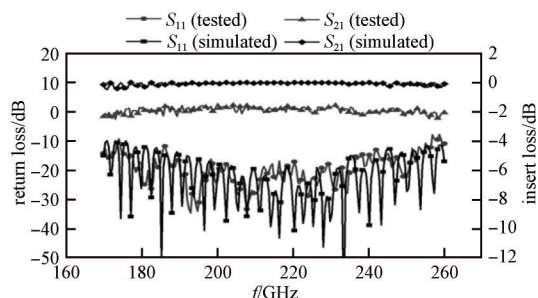
3) G 波段全波导径向合成

在 G 波段，南京电子器件研究所设计了一种 4 路波导高效合成器。该合成器由 5 个矩形波导直接组成，1 个输出波导，4 路输入波导呈径向分布。通过结构正中心的圆柱凸台，一次性实现了 4 个支路的阻抗匹配。4 路径向波导合成器实物如图 7(a)所示。该模块的外形尺寸仅为 21 mm×21 mm×12 mm，非常紧凑。相比采用矩形波导 T 型结的 4 路合成器，4 个独立的合成支路实际的传输距离很短，从公共端 P1 到单个支路的传输长度仅为 16 mm；损耗很低，在 180~250 GHz 的工作频带内，插入损耗值优于 -1.2 dB，平均值为 -0.73 dB，折算成合成效

率为 88%，测试结果如图 7(b)所示。



(a) physical picture



(b) measured results

Fig.7 G-band 4-channel radial power combiner

图 7 G 波段 4 路径向波导合成器

3.2 基于矩形波导的合成技术

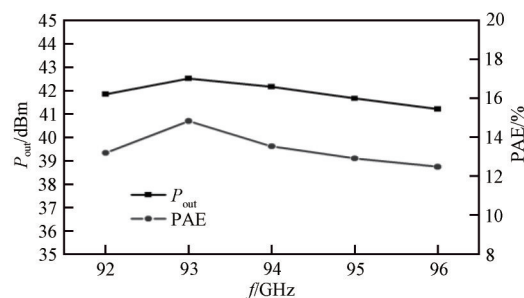
矩形波导 T 型结是波导二进制合成中经典的结构，广泛用于功率合成模组中。南京电子器件研究所基于该结构的功率合成器，设计出 W 波段、G 波段的固态功率放大器模块。

1) W 波段 15 W 以及 100 W 固态功率放大器

南京电子器件研究所基于双面布局的小型化 T 型结合成结构，设计了一种 8 路合成的 W 波段合成器。每一路连接 2 W 的功放模块，最终完成了 92~95 GHz 输出 15 W 的固态功放模组，如图 8(a)所示。该模块的外形尺寸为 66 mm×66 mm×24 mm，内部结构非常紧凑。测试结果如图 8(b)所示，在 92~96 GHz 的工作频带内，输出功率达到 41.2 dBm 以上，电源 PAE 达到 12.5% 以上；在 93 GHz 处，获得了峰值输出功率 42.5 dBm，效率 14.8%。



(a) physical picture



(b) measured results

Fig.8 W-band 15 W miniaturized power amplifier module

图 8 W 波段 15 W 小型化功放模块

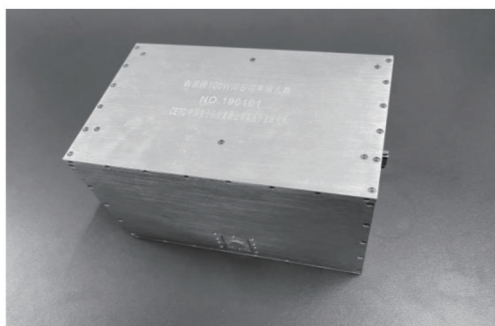
南京电子器件研究所进一步通过 64 路矩形波导 T 型结合成结构，实现了 W 波段 100 W 输出的固态功率放大器模组，该模块外形尺寸为 185 mm×115 mm×110 mm，如图 9(a)所示。测试结果如图 9(b)所示，实际测得输出功率大于 50.15 dBm(103.5 W)，PAE 大于 10.5%^[28]。该模块为国内目前能查询到的功率最大的 W 波段固态功放模块。

2) G 波段 1 W 固态功率放大器

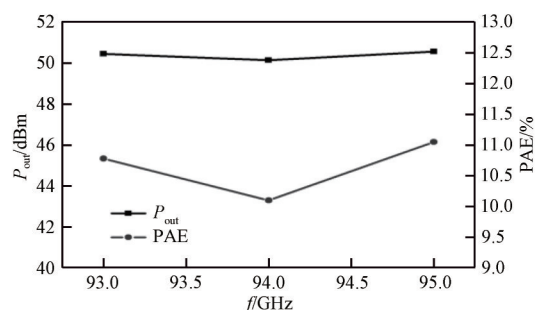
南京电子器件研究所采用 16 路波导 T 型结合成结构和自主研发的 GaN 功放芯片，研制了 G 波段瓦级合成功放模块，如图 10(a)所示。测试结果如图 10(b)所示，该功放在漏压 +10 V 的条件下，最终获得输出功率的最高点频率为 189 GHz，输出功率达到了 1.03 W；在 216 GHz、237 GHz 等频率，输出功率都超过了 700 mW^[29]。该模块为国内目前能查询到的功率最大的 G 波段固态功放模块。

3.3 硅基波导功率合成技术

前文提到的合成器采用的加工方法都是传统的机械加工工艺，随着频率的进一步升高，这种工艺传输损耗将越来越大。同时传统的金属机械加工方式通常采用螺钉固定，在高频段，螺钉的尺寸已远大于波导口的尺寸，将大大增加额外的波导传输尺寸，造成额外的传输损耗。为解决这一问题，提出了基于硅微机械加工技术的波导电路结构^[30]。



(a) physical picture



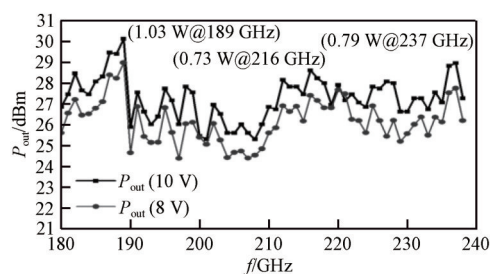
(b) measured results

Fig.9 W-band 100 W miniaturized power amplifier module

图9 W波段 100 W 小型化功放模块



(a) physical picture



(b) measured results

Fig.10 G-band 1 W power amplifier module

图10 G波段 1 W 固态功率放大器

硅微机械加工技术即采用微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术, 通过刻蚀、掩膜、镀金、键合等工艺实现波导腔。采用这种工艺制作的波导结构, 具有极好的加工精确度和极高的光洁度, 且不再需要额外尺寸用于固定, 因此也具有较好的合成效率。

1) 基于MEMS工艺的硅基波导合成技术

南京电子器件研究所采用了自主 8 in MEMS 工艺平台, 制作了一款 H-T 硅基波导合成器。该合成器的尺寸为 $12\text{ mm} \times 9.5\text{ mm} \times 1.45\text{ mm}$, 如图 11(a)所示; 两端口相位一致性测试结果如图 11(b)所示, S_{11} 、 S_{21} 实测结果与仿真结果对比如图 11(c)~(d)所示, 在 90~100 GHz 的频率范围内, 该硅基合成器(含测试夹具)的回波损耗仿真结果优于 15 dB, 测试结果优于 12 dB; 插入损耗仿真结果优于 -3.1 dB, 测试结果优于 -3.4 dB; 带内插入损耗平均值为 -3.2 dB。测试结果显示该合成器的幅度一致性在 $\pm 0.15\text{ dB}$ 以内, 相位一致性在 $\pm 2^\circ$ 以内, 展现出很好的平衡性, 由此可预计该合成器的合成效率高于 95.5%^[31]。

2) 基于硅基波导的功率合成放大器模组

基于上述 H-T 硅基波导合成器, 结合南京电子器件研究所 W 波段 GaN 功放芯片, 研制了一个两路合成的功放模块。图 12(a)为该两路硅基合成功放模块的实物照片。该模块的尺寸为 $31\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 7\text{ mm}$, 相比传统的波导合成模块, 体积更小。测试结果如图 12(b)所示, 在 92~96 GHz 频率范围内, 输出功率高于 3.72 W, PAE 高于 12.9%; 在 94 GHz 处获得最高峰值功率 4.25 W, PAE 为 14.7%, 典型合成效率大于 92%^[31]。

在上述研究基础上, 南京电子器件研究所采用 1 个硅基 3 dB 电桥和 2 个硅基 H-T 波导合成器级联的结构制作了一个 4 路合成器, 并实现一款 4 路合成的固态功放模块, 如图 13(a)所示。在连续波条件下的测试结果如图 13(b)所示, 该 4 路硅基功放模块在 92~96 GHz 的频率范围内, 输出功率典型值为 8 W; 在 96 GHz 处功率最低为 7.03 W, PAE 为 13.0%; 在 94 GHz 处达到最大功率 8.05 W, PAE 达到 15.05%, 平均合成效率 88%^[32]。

结合上述硅基波导功率合成技术和径向功率合成技术的研究成果, 南京电子器件研究所采用自主 8 in MEMS 工艺平台, 研制了 W 波段硅基径向功率合成器。以 TM_{01} 模作为传输主模实现 8 路合成, 同时研制了 TM_{01} 模式转换器, 实现圆波导 TM_{01} 模到矩形波导 TE_{10} 模式的转换。通过集成南京电子器件研究所最新研制的 W 波段 4 W GaN 功放芯片^[5], 最终实现了 8 路硅基径向合成功放, 如图 14(a)所示。测试结果如图 14(b)所示, 在 94~98 GHz 频段内, 输出功率大于 24.7 W, PAE 大于 11%; 在 96 GHz 处峰值输出功率为 31 W, PAE 为 13.2%, 平均合成效率约为 83%。硅基径向合路器相比矩形波导合路器具有更高的合成效率, 且体积更小。硅基径向合成功放模块小型化、轻量化的特点, 更适合未来无线通信对于毫米波太赫兹频段大功率放大器的小型化需求^[33]。

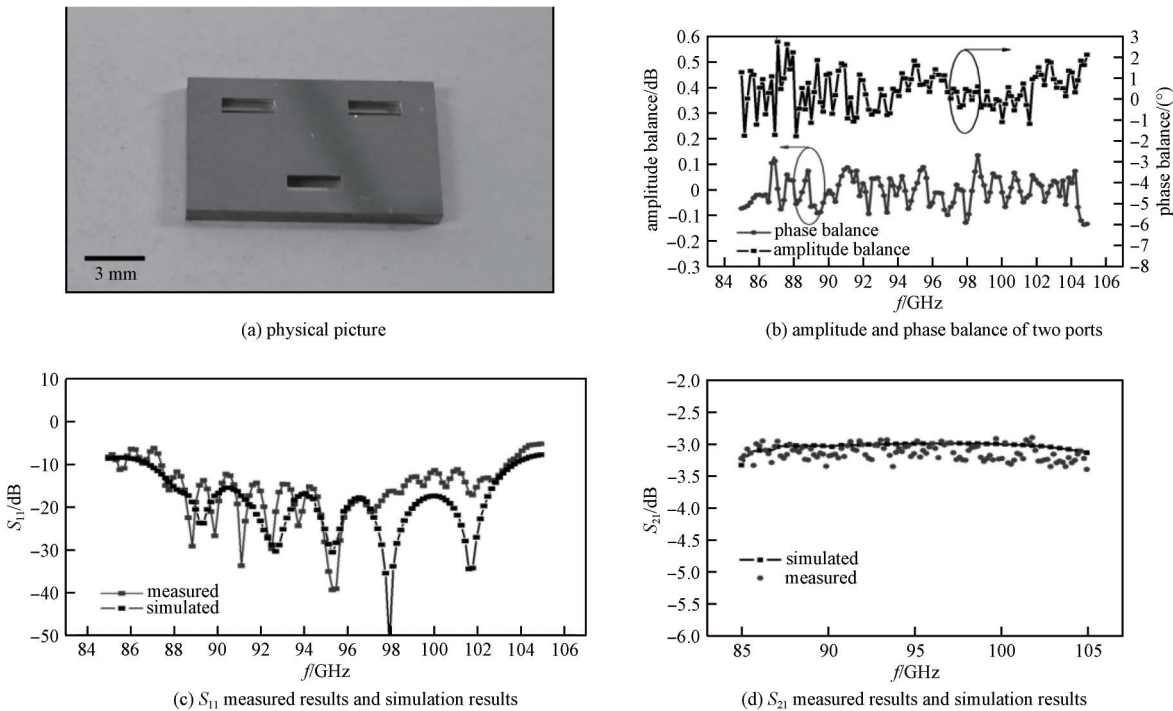


Fig.11 Silica-based 4-channel power combiner
图 11 H-T 硅基波导合成器

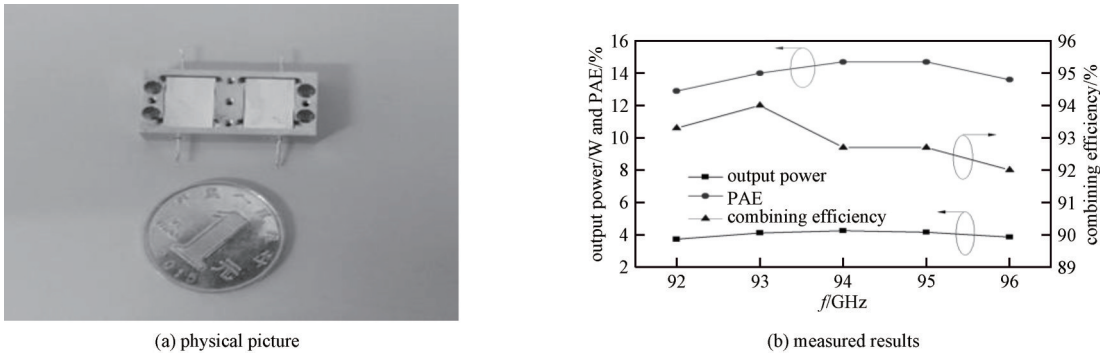


Fig.12 Silica-based 2-channel amplifier module
图 12 2 路硅基合成功放模块

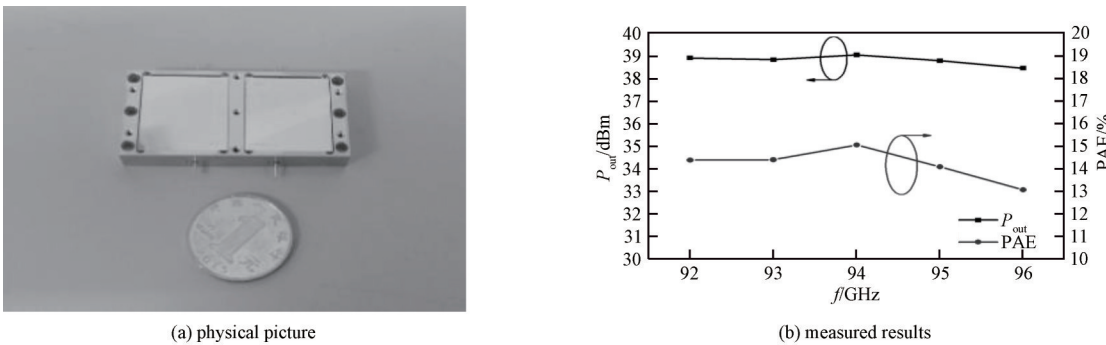


Fig.13 Silica-based 4-channel power amplifier module
图 13 4 路硅基合成功放模块

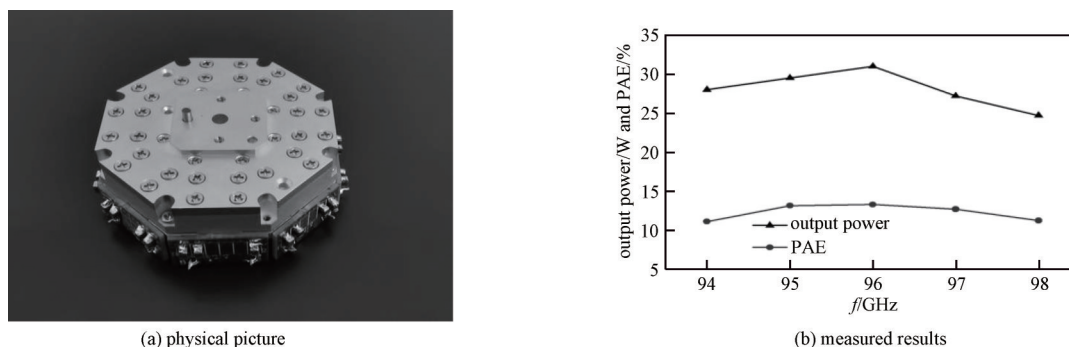


Fig.14 Silica-based radial power amplifier module

图 14 硅基径向合成功放模块

4 结语

本文总结了近年来国内外,特别是南京电子器件研究所,在 W 波段和 G 波段基于功率合成的功率放大器的研究成果。南京电子器件研究所立足自主 GaN 芯片,以实现基于高效功率合成的大功率小型化固态功率放大器为目标,对 W 波段和 G 波段固态功率合成的相关理论和工程技术展开深入研究。研制了圆波导径向功率合成器、基于矩形波导合成的太赫兹功放模块以及基于微机械加工工艺的硅基波导合成功放,实现的 W 波段 100 W 固态功放模块、G 波段 1 W 固态功放模块等指标具备较高的先进性。研制的圆波导 W 波段径向合成器相比于 Quinstar 公司提出的径向合成器^[15],具有更高的合成效率。基于矩形波导 W 波段 100 W 固态功放模块相比于 2022 年 Raytheon 公司提出的 100 W 固态功放模块^[16],尺寸相当;在同样脉冲占空比的条件下,南京电子器件研究所的功放模块可以获得更大的输出功率,并具有更高的电源效率。基于微机械加工工艺的 W 波段硅基波导合成功放,相比于国内外所有报导的 W 波段基于矩形波导合成功放,具有更小的尺寸和更高的合成效率。基于微机械加工工艺的硅基径向合成功放,相比于 Quinstar 公司提出的径向合成功放^[15],功率指标相当,但尺寸减小了 75%。G 波段 1 W 固态功放相比于 Teledyne 公司提出的 G 波段合成功放^[23],具有更高的输出功率,首次突破 G 波段 1 W 的功率输出,取得了显著成果。

参考文献:

- [1] 王长,郑永辉,谭智勇,等. 太赫兹波导发展现状与展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(3):241-260. (WANG Chang, ZHENG Yonghui, TAN Zhiyong, et al. Recent advances in terahertz waveguide[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(3):241-260.) doi:10.11805/TKYDA2021308.
- [2] 闵碧波,曾嫦娥,印欣,等. 太赫兹技术在军事和航天领域的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):351-354. (MIN Bibo, ZENG Change, YIN Xin, et al. Application of terahertz techniques in military and space[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):351-354.) doi:10.11805/TKYDA201403.0351.
- [3] 李新胜. 毫米波 400 W 连续波固态功放设计[J]. 无线电工程, 2017,47(1):59-61,70. (LI Xinsheng. Design of millimeter-wave 400 W CW solid state power amplifier[J]. Radio Engineering, 2017,47(1):59-61,70.)
- [4] 刘祚麟,党章,李凯,等. 毫米波固态功放技术研究现状及发展趋势[C]// 2018 年全国微波毫米波会议论文集(下册). 成都:中国电子学会, 2018:187-190. (LIU Zuolin, DANG Zhang, LI Kai, et al. Research status and development trend of millimeter wave solid state power amplifier technology[C]// Proceedings of the 2018 National Microwave and Millimeter Wave Conference (Volume 2). Chengdu, China: Chinese Institute of Electronics, 2018:187-190.)
- [5] WANG Weibo, GUO Fangjin, CHEN Tangsheng, et al. A W-band power amplifier with distributed common-source GaN HEMT and 4-way Wilkinson-Lange combiner achieving 6 W output power and 18% PAE at 95 GHz[C]// 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2020: 376-378. doi: 10.1109/ISSCC19947.2020.9063161.
- [6] SCHELLENBERG J M. A 2 W W-band GaN traveling-wave amplifier with 25 GHz bandwidth[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015,63(9):2833-2840. doi:10.1109/TMTT.2015.2453156.
- [7] WU Shaobing, GAO Jianfeng, WANG Weibo, et al. W-band MMIC PA with ultrahigh power density in 100 nm AlGaIn/GaN technology[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016,63(10):3882-3886. doi:10.1109/TED.2016.2597244.
- [8] SCHELLENBERG J, KIM B, PHAN T. W-band, broadband 2 W GaN MMIC[C]// 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). Seattle, WA, USA: IEEE, 2013:1-4. doi:10.1109/MWSYM.2013.6697656.

- [9] GRIFFITH Z, URTEAGA M, ROWELL P, et al. A 50~80 mW SSPA from 190.8~244 GHz at 0.5 mW P_{in} [C]// 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS2014). Tampa, FL, USA: IEEE, 2014:1-4. doi:10.1109/MWSYM.2014.6848245.
- [10] GRIFFITH Z, URTEAGA M, ROWELL P, et al. A 23.2 dBm at 210 GHz to 21.0 dBm at 235 GHz 16-way PA-cell combined InP HBT SSPA MMIC[C]// 2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). La Jolla, CA, USA: IEEE, 2014:1-4. doi:10.1109/CSICS.2014.6978528.
- [11] MICOVIC M, KURDOGHILIAN A, MARGOMENOS A, et al. 92~96 GHz GaN power amplifiers[C]// 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012:1-3. doi:10.1109/MWSYM.2012.6259572.
- [12] GRIFFITH Z, URTEAGA M, ROWELL P. A compact 140 GHz, 150 mW high-gain power amplifier MMIC in 250 nm InP HBT[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(4):282-284. doi:10.1109/LMWC.2019.2902333.
- [13] SCHELLENBERG J, WATKINS E, MICOVIC M, et al. W-band, 5 W solid-state power amplifier/combiner[C]// 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2010:240-243. doi:10.1109/MWSYM.2010.5517616.
- [14] SCHELLENBERG J, TRAN A, BUI L, et al. 37 W, 75~100 GHz GaN power amplifier[C]// 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016:1-4. doi:10.1109/MWSYM.2016.7540195.
- [15] SORIC J, KOLIAS N, SAUNDERS J, et al. A 100 W W-band GaN SSPA[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(6):712-715. doi:10.1109/LMWC.2022.3164710.
- [16] 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. doi:10.1109/TMTT.2014.2362133.
- [17] SCHOCH B, TESSMANN A, LEUTHER A, et al. 260 GHz broadband power amplifier MMIC[C]// 2019 The 12th German Microwave Conference(GeMiC). Stuttgart, Germany: IEEE, 2019:232-235. doi:10.23919/GEMIC.2019.8698140.
- [18] GRIFFITH Z, URTEAGA M, ROWELL P, et al. A 160~183 GHz 0.24 W(7.5% PAE) PA and 0.14 W(9.5% PAE) PA, high-gain, G-band power amplifier MMICs in 250 nm InP HBT[C]// 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2020:488-491. doi:10.1109/IMS30576.2020.9223876.
- [19] GRIFFITH Z, URTEAGA M, ROWELL P, et al. A 150~175 GHz 30 dB S_{21} G-band power amplifier with 0.25 W P_{out} and 15.7% PAE in a 250 nm InP HBT technology[C]// 2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS 2022). Denver, CO, USA: IEEE, 2022:444-447. doi:10.1109/IMS37962.2022.9865385.
- [20] GRITTERS D, BROWN K, KO E. 200~260 GHz solid state amplifier with 700 mW of output power[C]// 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2015:1-3. doi:10.1109/MWSYM.2015.7166808.
- [21] ROLLIN J M, MILLER D, URTEAGA M, et al. A polystarata® 820 mW G-band solid state power amplifier[C]// 2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). New Orleans, LA, USA: IEEE, 2015: 1-4. doi: 10.1109/CSICS.2015.7314481.
- [22] 吴少兵, 高建峰, 王维波, 等. W波段 GaN 单片功率放大器研制[J]. 固体电子学研究进展, 2016, 36(4):266-269. (WU Shaobing, GAO Jianfeng, WANG Weibo, et al. Fabrication of W-band GaN MMIC PA[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2016, 36(4):266-269.)
- [23] WU Shaobing, GUO Fangjin, GAO Jianfeng, et al. W-band AlGaIn/GaN MMIC PA with 3.1 W output power[C]// 2017 the 14th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China(SSLChina: IFWS). Beijing, China: IEEE, 2017:219-223. doi:10.1109/IFWS.2017.8246016.
- [24] ZHU Fang, LUO Guoqing. A W-band balanced power amplifier in 0.1 μm GaAs PHEMT process[C]// 2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium(IWS). Shanghai, China: IEEE, 2020:1-3. doi:10.1109/IWS49314.2020.9359958.
- [25] 刘如青, 张力江, 魏碧华, 等. W波段三路合成 GaN 功率放大器 MMIC[J]. 半导体技术, 2021, 46(7):521-525, 564. (LIU Ruqing, ZHANG Lijiang, WEI Bihua, et al. W-band GaN power amplifier MMIC using three-way combination technology[J]. Semiconductor Technology, 2021, 46(7):521-525, 564.) doi:10.13290/j.cnki.bdtjs.2021.07.005.
- [26] LI Xingcun, CHEN Wenhua, LI Shuyang, et al. A high-efficiency 142~182 GHz SiGe BiCMOS power amplifier with broadband slotline-based power combining technique[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2022, 57(2): 371-384. doi: 10.1109/JSSC.2021.3107428.
- [27] 成海峰, 朱翔, 郭健. W波段低损耗径向功率合成器设计[J]. 固体电子学研究进展, 2019, 39(2):102-105, 115. (CHENG Haifeng, ZHU Xiang, GUO Jian. Design of W-band low-loss radial power combiner[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2019, 39(2):102-105, 115.)
- [28] 成海峰, 朱翔, 徐建华, 等. W波段 100 W GaN 固态功率放大器[J]. 固体电子学研究进展, 2020, 40(2):159. (CHENG Haifeng, ZHU Xiang, XU Jianhua, et al. W-band 100 W GaN solid-state power amplifier[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2020, 40(2):159.) doi:10.19623/j.cnki.rpsse.2020.02.016.

- [29] 成海峰,朱翔,徐建华,等. G波段 1 W GaN 固态功率放大器[J]. 固体电子学研究进展, 2022,42(1):81. (CHENG Haifeng, ZHU Xiang,XU Jianhua,et al. G-band 1 W GaN solid-state power amplifier[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2022,42(1):81.) doi:10.19623/j.cnki.rpsse.2022.01.006.
- [30] FRAZIER A B, WARRINGTON R O, FRIEDRICH C. The miniaturization technologies: past, present, and future[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995,42(5):423–430. doi:10.1109/41.464603.
- [31] CHENG Haifeng,HOU Fang, GUO Jian, 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. doi: 10.1109/TCPMT. 2020. 2980958.
- [32] 成海峰,朱翔,侯芳,等. 基于硅微机械加工波导 W 波段功率合成放大器[J]. 红外与毫米波学报, 2021,40(2):178–183. (CHENG Haifeng, ZHU Xiang, HOU Fang, et al. W-band power combining amplifier based on silicon micromachined waveguide[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021,40(2):178–183.) doi:10.11972/j.issn.1001–9014.2021.02.007.
- [33] CHENG Haifeng, ZHU Xiang, HOU Fang, et al. Compact 31 W 96 GHz amplifier module in GaN–MEMS for wireless communications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(2): 1233–1241. doi: 10.1109/TMTT. 2021.3121003.

作者简介:

杜佳谕(1999–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波固态合成技术. email:djy5521@163.com.

成海峰(1983–), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波固态功率合成技术、太赫兹技术、固态功率放大器设计.

朱翔(1989–), 男, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波固态功率合成技术、太赫兹技术、固态功率放大器设计.

郭方金(1988–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为毫米波、亚毫米波、太赫兹电路设计.

王维波(1976–), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为毫米波、亚毫米波、太赫兹电路设计.