

硅基太赫兹发射机集成电路研究进展*

陈 喆^{1,2**} 周培根^{1,2} 李泽坤^{1,2} 唐大伟^{1,2} 张 睿^{1,2} 严 铮^{1,2} 唐思远^{1,2} 周 睿^{1,2}
齐 玥^{1,2} 严蘋蘋^{1,2} 高 亮^{1,2} 陈继新^{1,2,3} 洪 伟^{1,2,3}(¹ 东南大学 信息科学与工程学院, 南京, 211111) (² 毫米波全国重点实验室, 南京, 211111)(³ 紫金山实验室, 南京, 211111)

2024-10-08收稿, 2024-10-23收改稿

摘要:近年来,太赫兹频段作为下一代6G通信技术的备选频段受到了广泛关注,太赫兹也成为研究热点。太赫兹集成电路(芯片)是推动各种太赫兹应用系统快速发展的关键。随着硅基工艺的特征频率/最大振荡频率(f_T/f_{max})不断提高,采用低成本硅基工艺,在太赫兹频段实现全集成的硅基太赫兹发射机成为可能。本文简要综述了基于硅基工艺的太赫兹发射机芯片技术的重要研究进展,包括150 GHz直接上变频发射机芯片、220 GHz滑动中频超外差发射机芯片,以及D波段直接调制发射机芯片。实验测试验证了太赫兹频段在高速通信应用中的优势,硅基太赫兹收发集成电路有望成为6G系统中突破高速数据速率需求的关键技术。

关键词:太赫兹;集成电路;硅基;通信

中图分类号:TN402;TN722.3 文献标识码:A 文章编号:1000-3819(2024)05-0406-08

Research Progress on Silicon-based Terahertz Transmitter
Integrated CircuitsCHEN Zhe^{1,2} ZHOU Peigen^{1,2} LI Zekun^{1,2} TANG Dawei^{1,2} ZHANG Rui^{1,2} YAN Zheng^{1,2}
TANG Siyuan^{1,2} ZHOU Rui^{1,2} QI Yue^{1,2} YAN Pinpin^{1,2} GAO Liang^{1,2} CHEN Jixin^{1,2}
HONG Wei^{1,2}(¹ School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 211111, CHN) (² State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing, 211111, CHN) (³ Purple Mountain Laboratories, Nanjing, 211111, CHN)

Abstract: In recent years, the terahertz frequency band has garnered extensive attention as an alternative frequency band for the next-generation 6G communication technology, and terahertz has thus emerged as a research focus. Terahertz integrated circuits (chips) are crucial for facilitating the rapid development of various terahertz application systems. With the continuous enhancement of characteristic frequency and maximum oscillation frequency (f_T/f_{max}) of silicon-based processes, it becomes feasible to achieve fully integrated silicon-based terahertz transmitters in the terahertz frequency band using silicon-based processes. This article briefly reviews significant research advancements in terahertz transmitter chip technologies based on silicon-based processes, including 150 GHz direct up conversion transmitter chips, 220 GHz sliding intermediate-frequency superheterodyne transmitter chips, and D-band direct modulation transmitter chips. Experimental results have verified the advantages of the terahertz frequency band in high-speed communication applications. Silicon-based terahertz trans-

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0210900);国家自然科学基金资助项目(62188102, 62171128)

** 联系作者: E-mail: zhechen@seu.edu.cn

ceiver integrated circuits are expected to be the key technology for breaking through the requirements of high data rates in 6G systems.

Key words: THz; integrated circuits; silicon-based; communication

引 言

随着 5G 在全球范围内规模商用,太赫兹^[1-5]作为第六代移动通信(6G)通信技术的备选频段受到了广泛的关注。太赫兹频段具有满足未来 6G 无线系统需求的多种优势:(1)数十至数百 GHz 的连续带宽;(2)皮秒级的符号持续时间;(3)集成数千个亚毫米级的天线;(4)易于与其他受管制的标准化频谱共存。太赫兹频段是电磁频谱中亟须探索的频段之一,但一直缺乏高效实用的太赫兹收发机。在过去十年中,在太赫兹收发领域取得的重大进展使实用的太赫兹通信系统成为可能^[6-15]。各种成功的实验演示证明了太赫兹频段巨大带宽在通信应用中的优势,太赫兹频段通信被认为是满足数据流量指数级增长以及 6G 系统中更高数据速率需求的关键技术之一。随着硅基工艺的特征频率/最大振荡频率(f_T/f_{max})不断提高^[16-17],采用低成本的硅基工艺,在太赫兹频段实现全集成的硅基太赫兹发射机成为一大热点,数据传输率已达到 100 Gbps 或更高^[18-24]。2023 年德国 IHP 报道了一款工作频率覆盖 D 波段、可支持 32QAM、调制速率达到 200 Gbps 的四通道通信收发芯片^[19]。2023 年清华大学基于 28 nm CMOS 工艺,设计实现了一款工作中心频率 140 GHz、采用开关键控(On-off keying, OOK)调制方式的收发机芯片,在 1 cm 距离下测试得到的无线传输速率达 26 Gbps^[24]。此外,国内的多机构如天津大学、华南理工大学、上海交通大学、杭州电子科技大学、中国工程物理研究院、中国电科集团等均报道了硅基太赫兹芯片领域的最新成果,展示了硅基太赫兹芯片在高速通信、高集成度、低成本应用等方面的极大潜能。

在各类发射机架构中,直接上变频发射机是一种常见的无线发射设备,特点是信号生成和处理采用上变频方式,直接将基带信号转换为射频信号进行传输。直接上变频发射机在设计和实现上更加简洁,具有一定的优势。超外差发射机是一种经典的无线发射架构,通过多级频率变换来产生高质量的射频信号。与直接上变频发射机不同,超外差发射机使用中频进行信号处理,以实现更好的频谱纯度、线性度和噪声性能。它在传统无线通信系统中

被广泛应用,特别是在需要高灵敏度和高精度频率合成的场景中。而简单的非相干数字调幅调制方式如 OOK 或四电平脉冲幅度调制(4-level pulse amplitude modulation, PAM-4)可以通过太赫兹频段较大的射频带宽支持极高的速率传输。由于不涉及相位调制,调幅调制方式对相位失真及载波相位噪声均无特别要求,不需要低相噪本振信号源电路,具有更低的信噪比门限要求。同时,数据流直接调制/解调的方式也避免了复杂的模数/数模转换器(Analog to digital converter/ Digital to analog converter, ADC/DAC)需求。在本文中,分别针对 150 GHz 直接上变频发射机^[25]、220 GHz 超外差发射机^[26]和 D 波段数字调制发射机^[27-28]进行了相关研究进展的简述。

1 150 GHz 直接上变频发射机

文献[25]中给出了一款 150 GHz 发射机,框图如图 1 所示,该系统由一个直接调制模式的 Sub 太赫兹射频前端集成一个片上介质谐振天线单元组成。中频频率(IF)输入范围覆盖 DC~10 GHz,旨在满足 Sub 太赫兹频段超高速无线通信系统对于带宽的需求。对于该直接调制模式发射机,当本振频率固定在 150 GHz 时,由于中频频率带宽覆盖 10 GHz,对应 Sub 太赫兹射频输出信号的频率范围覆盖 140~160 GHz。上变频器采用 micro-mixer 结构,该结构有着天然的射频端口到本振端口的高隔离度性能。此外,为了有效地增加无线传输距离(目标覆盖半米的距离),该发射机需要提供足够的输出功率,故在混频器之后连接功率放大器,放大调制后的射频信号。考虑到片外键合或采用波导转接的损耗,该发射机集成了具有高辐射效率和增益的片上高次模介质谐振天线单元,以实现无线数据传输。

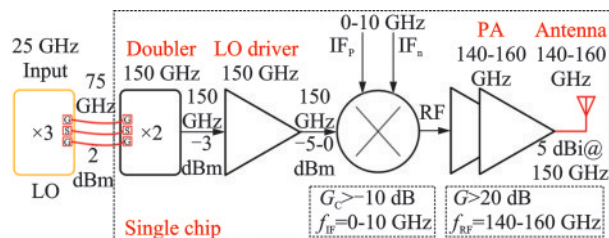


图 1 150 GHz 发射机系统框图

Fig.1 Diagram of 150 GHz transmitter system

在140~160 GHz频带范围内,由图2(a)可知该发射机的饱和输出功率(P_{sat})均高于8 dBm,当中频信号频率为1 GHz、本振信号频率为148 GHz时,发射机的饱和输出功率达到最大值12 dBm。此外,该发射机的最大变频增益达到17 dB,直流功耗为360 mW。由图2(b)观察到当射频频率(f_{RF})为144 GHz时,该发射机变频增益最大,为14 dB,且

在整个发射机工作频带范围内,其单边带变频增益均高于11 dB。由图2(c)可知,随着本振信号输入功率的增加,单边带射频输出信号功率不断增加,当输入本振信号功率为-5 dBm时,对应的单边带射频信号功率达到其输出1 dB压缩点8.4 dBm,考虑到在150 GHz频点处有一个等值的射频输出信号,因此射频输出信号总的1 dB压缩点为11.4 dBm。

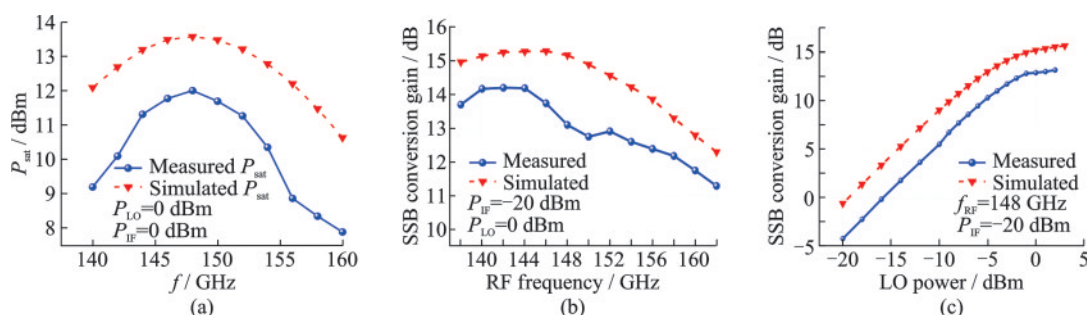


图2 150 GHz发射机芯片的仿真和测试结果: (a) 输出功率; (b) 单边带变频增益随射频频率的变化; (c) 单边带变频增益随本振功率的变化

Fig.2 Simulated and test results of 150 GHz transmitter chip: (a) Output power; (b) Single sideband frequency conversion gain varying with RF frequency; (c) Single sideband frequency conversion gain varying with LO power

2 220 GHz滑动中频超外差发射机

在直接变频架构中,混频器的本振(LO)频率与射频(RF)频率一样高,因此,要实现工作在200 GHz以上的直接变频收发系统,需要一个工作在200 GHz以上的信号源作为本振信号。

两种实现太赫兹信号源的方案为太赫兹倍频链和太赫兹压控振荡器。太赫兹压控振荡器受限于晶体管的 f_{max} 和变容管的品质因数(Q值),相位噪声和调谐范围无法兼顾,并且输出功率较低,较难驱动太赫兹频段的混频器,因此,在太赫兹频段常用外部信号源或低频的压控振荡器级联倍频链作为本振信号源。高次倍频器不是谐波输出功率和转换增益较低,就是直流功耗消耗较大;另外,工作在200 GHz以上基于倍频链的信号源,通常需要采用多级倍频级联,功耗较大,效率较低。

对于工作在200 GHz以上的直接变频方案中的混频器来说,需要的本振功率非常高,因此本振信号源的功耗也非常高,不利于高效率的设计。另外,在太赫兹频段,随着频率的提高,晶体管的非线性模型准确度下降,这也给直接变频方案带来挑战。在滑动中频方案中,本振信号的频率低于射频频率,工作频率较低的倍频器可以以较低的功耗实现较高的输出功率,因此在这个架构中,太赫兹频

段的上变频器的线性度得到改善,同时本振信号源的功耗也较低,此外,混频器的本振端口工作频率较低,晶体管非线性模型将更加准确。另一方面,滑动中频架构仅需要一个外部信号源或振荡器,而传统的超外差架构需要两个,且有一个信号源工作频率较高,增加了系统复杂度。采用滑动中频架构,本振信号数量少,镜像和本振信号在带外,且本振信号与射频信号的比值低。

发射机链路射频性能主要由220 GHz的功率放大器、高频段的混频器和低频段的I/Q混频器决定。发射机的线性度是发射机链路预算中最需要关注的指标,尤其是混频器的输出功率1 dB压缩点($P_{1\text{dB}}$)和后级功率放大器的增益的选择,需确保混频器不会提早压缩而恶化发射机的线性度。文献[26]介绍了一款220 GHz滑动中频超外差发射机,图3给出了该发射机链路的射频性能指标,高频段的混频器仿真的 $P_{1\text{dB}}$ 约-7 dBm,后级功率放大器的小信号增益(G)约23 dB,放大器增益足够高,确保混频器的变频增益不会在放大器增益压缩之前压缩。综上所述,发射机的中频到射频的转换增益约38.5 dB,射频输出的 $P_{1\text{dB}}$ 约6 dBm,包含前级的本振信号生成器,发射机的总功耗约640 mW,得益于滑动中频的架构,发射机的功耗可以保持在一个较低的水平。

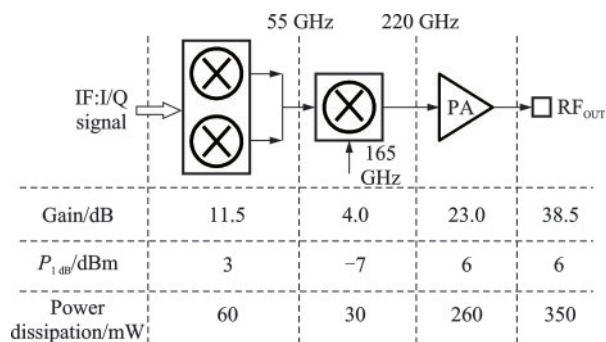


图3 220 GHz滑动中频发射机架构与射频链路性能
Fig.3 Architecture of 220 GHz sliding IF transmitter and performance of RF link

发射机在片单音测试结果如图4和图5所示。如图4(a)所示,在固定中频频率为1 GHz、功率为-44 dBm时,改变本振频率,测得中频到射频的转换增益(G_c),实测的峰值转换增益约38.5 dB,3 dB带宽约42 GHz(196~238 GHz);固定中频信号功率为-22 dBm时,改变本振频率,测得发射机的饱和输出功率,在211 GHz处,发射机饱和输出功率达到8.7 dBm,1 dB带宽约33 GHz(191~224 GHz),3 dB带宽约42 GHz(189~231 GHz);在211~

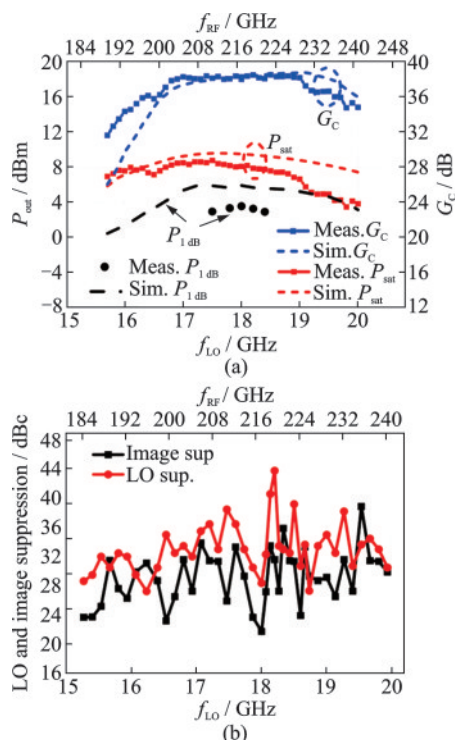


图4 固定中频频率为1 GHz时发射机在片单音测试结果:
(a) 仿真和实测的 G_c 、 P_{sat} 和 $P_{1\text{dB}}$; (b) 实测本振抑制和
图4 Transmitter on chip single tone test results at a fixed
IF frequency of 1 GHz: (a) Simulated and measured
 G_c , P_{sat} and $P_{1\text{dB}}$; (b) Measured local oscillation sup-
pression and image frequency suppression

222 GHz频段范围内, $P_{1\text{dB}}$ 大于2.9 dBm。在发射机中,低频段混频器的本振和镜像频率信号仍然会被上变频到射频频带内,如图4(b)所示,在固定中频频率为1 GHz、功率为-22 dBm时,发射机输出功率达到饱和,改变本振频率,测量低频段混频器的本振和镜频抑制,实测结果显示了大于26 dBc的本振抑制和大于22 dBc的镜频抑制。此外,固定本振频率为17.5 GHz,改变中频频率,测量发射机中频带宽的特性,受限于任意波形信号发生器,实测的中频信号频率仅限于6 GHz以下,如图5所示。发射芯片模组(结合硅透镜)在210~230 GHz范围内的有效各向辐射功率(Effective isotropic radiated power, EIRP)大于10 dBm。图6所示为220 GHz收发芯片在收发距离0.2 m时的空口对传测试平台。图7所示为220 GHz收发芯片模组进行空口对传时,星座图、误差向量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)及信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)的测试结果。

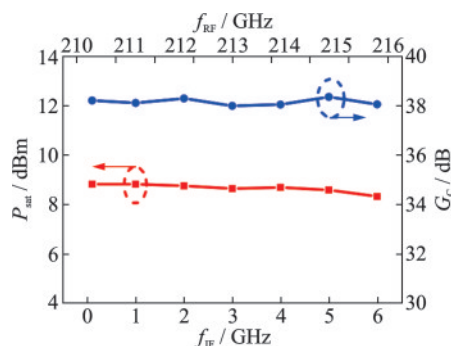


图5 固定本振频率为17.5 GHz,改变中频频率时,发射机
在片单音测试的 G_c 和 P_{sat}
Fig.5 Transmitter on chip single tone test results of G_c and
 P_{sat} vary with IF frequency at a fixed LO frequency of
17.5 GHz

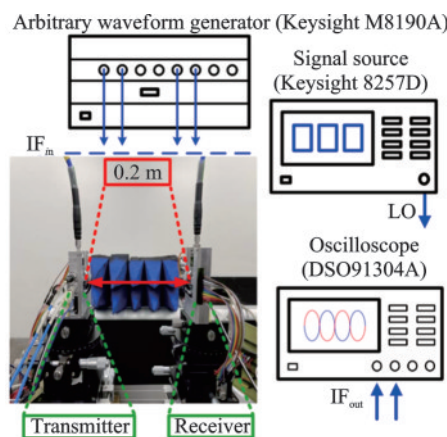


图6 220 GHz收发芯片空口对传测试平台(收发距离0.2 m)
Fig.6 Test platform for air interface communication of
220 GHz transceiver chip (Transceiver distance 0.2 m)

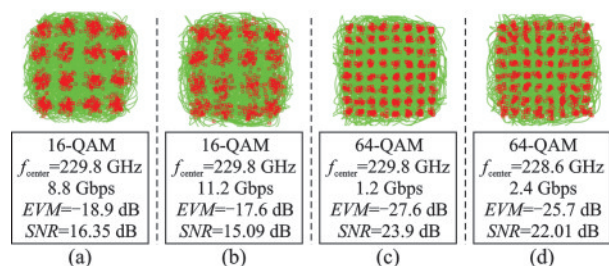


图7 220 GHz收发芯片模组空口对传时的星座图、EVM及SNR测试结果: (a) 16-QAM 2.2 GSym/s; (b) 16-QAM 2.8 GSym/s; (c) 64-QAM 0.2 GSym/s; (d) 64-QAM 0.4 GSym/s

Fig.7 Test results of constellation diagram, EVM and SNR of 220 GHz transceiver chip module: (a) 16-QAM 2.2 GSym/s; (b) 16-QAM 2.8 GSym/s; (c) 64-QAM 0.2 GSym/s; (d) 64-QAM 0.4 GSym/s

3 D波段数字调制发射机

在D波段发射机采用高阶调制可以实现较高的通信速率。但高阶调制需要配合低相噪本振信号源电路,以及复杂的ADC/DAC来使用,这不利于系统的小型化、低成本和低功耗。而简单的非相干调制方式如OOK或PAM-4可以在不借助复杂的扩展电路的情况下实现数据传输。这些调制方式的缺点是带宽利用率低,通常需要较大的射频带宽以支持更高的速率传输,但是这对于频谱资源非常丰富的毫米波或太赫兹频段来说是可以接受的。在足够宽的射频带宽下,仅使用简单的非相干调制可以实现相当高的数据传输速率。

文献[27]中介绍了一款D波段OOK收发机,系统框图如图8所示,发射机电路包含频率源、OOK调制器和功率放大器。频率源采用压控振荡器、二倍频器和驱动放大器级联的形式实现,该结构具有最好的可调节性、通用性和稳定性。对于OOK调制器,主要考虑拓宽射频带宽和提高开关隔离度性能。

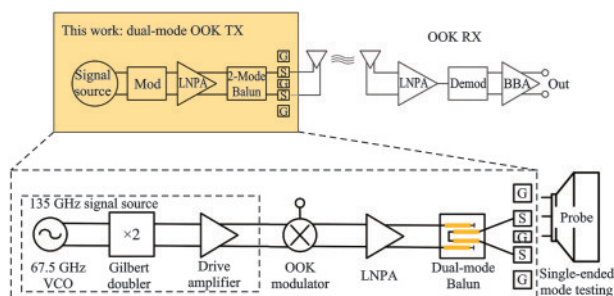


图8 D波段OOK收发机系统框图

Fig.8 Diagram of D-band OOK transceiver system

发射机前端包含工作在135 GHz附近的频率源、OOK调制器和低噪声功率放大器(Low noise power amplifier, LNPA);接收机前端包含一个与发射机中相同的LNPA、包络检波解调器(Demod)和宽带基带放大器(BBA)。在发射机中,载波信号由频率源产生,送至调制器中并由基带信号调制,再通过放大器进行放大,最后通过双模巴伦输出。

在该系统架构中包含了三个系统级的创新性设计:其一是在收发机中使用相同的LNPA来代替传统发射机中的功率放大器(Power amplifier, PA)和接收机中的低噪声放大器(Low noise amplifier, LNA),目的是为了提高系统射频带宽;其二是使用双模巴伦配合差分射频焊盘(地—信号—地—信号—地, GSGSG)以同时支持单端或差分接口;其三是通过增益可调的LNPA和功率可调的频率源在不同场景下提供不同的增益和功率,如图9所示,以防止收发机系统开关隔离度降低从而恶化系统信噪比。

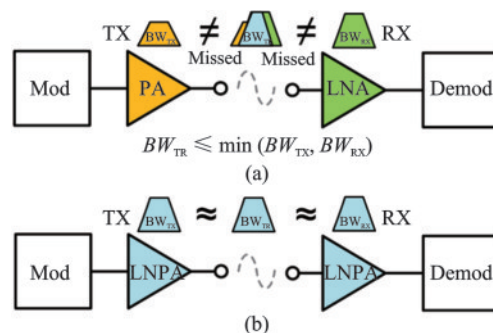


图9 发射机和接收机中同时使用LNPA的优势: (a) 分别使用PA和LNA会产生带宽损失; (b) 使用LNPA以提高收发机带宽重叠

Fig.9 Advantages of using LNPA in transmitter and receiver at the same time: (a) Using PA and LNA separately will cause bandwidth loss; (b) Using LNPA to improve transceiver bandwidth overlap

图10展示了该频率源的输出频率和输出功率的仿真和测试结果,并给出了功率调节特性的测试结果。该频率源可以在130~140 GHz之间连续调谐,满足发射机系统对频率的需求。频率源的最大输出功率超过3 dBm,且可以连续调节至-6 dBm以下,其中 V_g 为栅压, V_t 为调谐电压。

将该OOK调制器视为射频开关以测试其静态性能。图11展示了该调制器的小信号和大信号特性,并分别给出了小信号和大信号隔离度。大信号测试是基于输入功率为0 dBm的单音本振信号完成的。可以看出,仿真显示的小信号和大信号隔离

度均超过 20 dB,在“开”状态下,3 dB 带宽覆盖整个 D 波段,插入损耗小于 5 dB。图 12(a)给出了不同基带信号频率下的转换增益线性度和 1 dB 压缩点,图 12(b)给出了不同基带信号功率下的转换增益带宽。该调制器在基带信号频率 15 GHz 时输入 1 dB 压缩点为 -3.8 dBm,输出 1 dB 压缩点为 -13.55 dBm,满足系统设计需求。

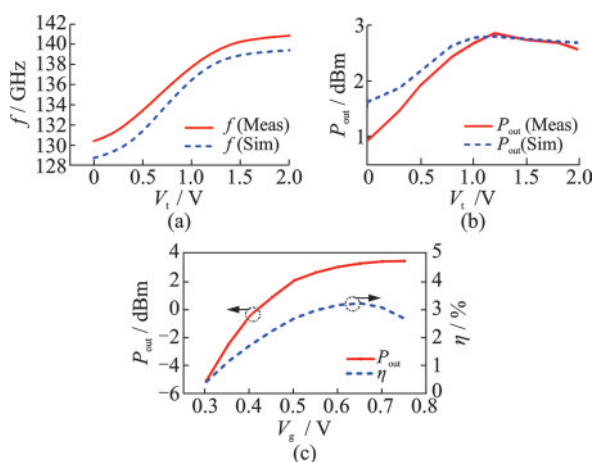


图 10 D 波段可调频率源的仿真和测试结果: (a) 调谐范围; (b) 输出功率 ($V_g=0.5$ V); (c) 135 GHz 处输出功率和效率随 V_g 变化

Fig.10 Simulated and measured results of D-band tunable frequency source: (a) Tuning range; (b) Output power ($V_g=0.5$ V); (c) Variation of output power and efficiency with V_g at 135 GHz

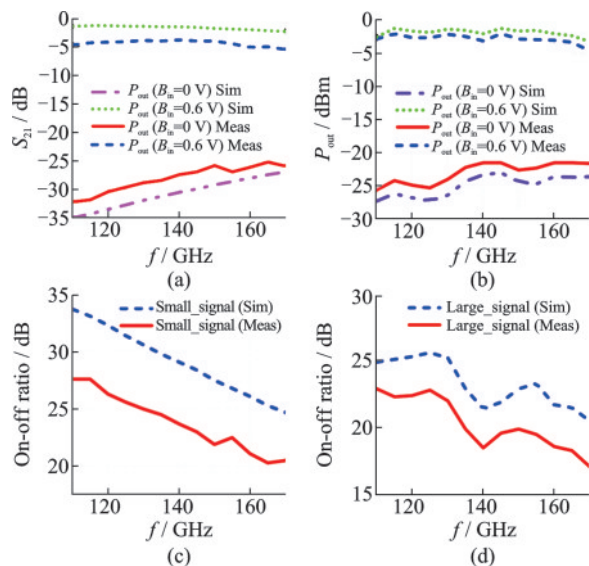


图 11 D 波段调制器仿真和测试结果: (a) 小信号 S 参数; (b) 大信号输出功率; (c) 小信号开关隔离度; (d) 大信号开关隔离度

Fig.11 Simulated and measured results of D-band modulator: (a) S-parameter of small signal; (b) Output power of large signal; (c) Switch isolation of small signal; (d) Switch isolation of large signal

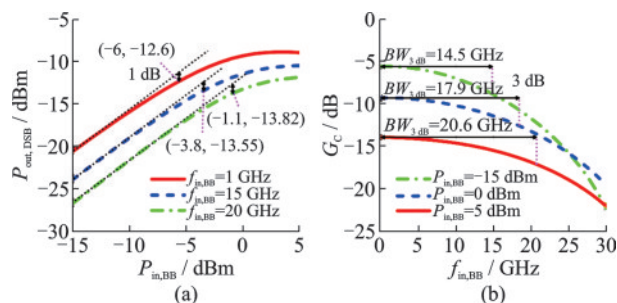


图 12 D 波段调制器仿真结果: (a) 转换增益线性度; (b) 转换增益带宽

Fig.12 Simulated results of D-band modulator: (a) Conversion gain linearity; (b) Conversion gain bandwidth

测试得到的小信号 S 参数和仿真得到的稳定性因子 k 的结果如图 13 所示,显示出了 110~160 GHz 的宽带范围内优异的小信号性能。仿真和测试得到的该 LNPA 在 135 GHz 处的压控增益特性如图 14(a)所示,显示该 LNPA 的小信号增益可以通过调节前四级的栅极偏压 V_{g1} 在 5~30 dB 之间连续调节。图 14(b)给出了仿真得到的全频带的压控增益特性,显示出调节增益对带宽的影响很小。如图 15 所示,该 LNPA 可以在 110~160 GHz 范围内输出超过 5 dBm 的功率,最大输出功率约 7 dBm,仿真和测试之间的误差约 1 dB。输出 1 dB 压缩点的仿真和测试结果展示出了很高的一致性,并证明了该放大器良好的线性度。在 110~160 GHz 范围内,该 LNPA 可以提供超过 22 dB 的增益,满足接收机对增益的需求。考虑到该 LNPA 的主要设计目标是宽带、高功率和低噪声,因此效率没有被特别优化,饱和状态下的功率附加效率 (PAE) 介于 2%~5% 之间。

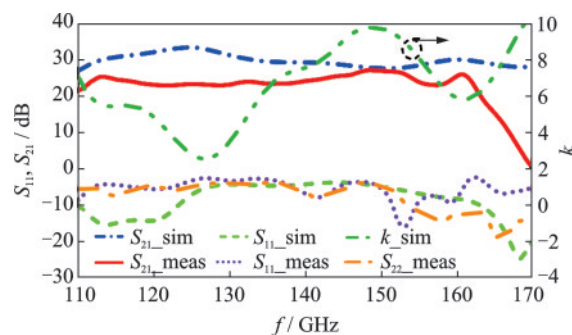


图 13 D 波段 LNPA 的小信号 S 参数的仿真和测试结果及稳定性因子 k 的仿真结果

Fig.13 Simulated and measured results of small signal S-parameter and simulated results of stability factor k of D-band LNPA

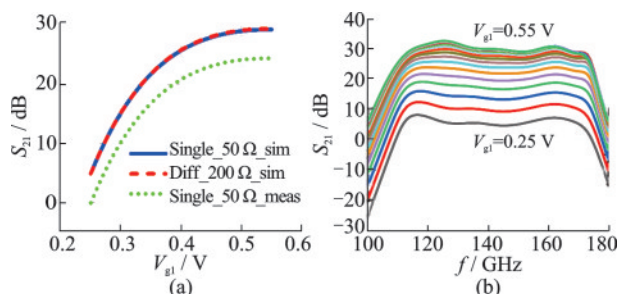


图14 D波段LNPA: (a) 135 GHz处的压控增益特性仿真和测试结果; (b) 压控增益的仿真结果

Fig.14 D-band LNPA: (a) Simulated and measured results of voltage-controlled gain characteristics at 135 GHz; (b) Simulated results of control gain

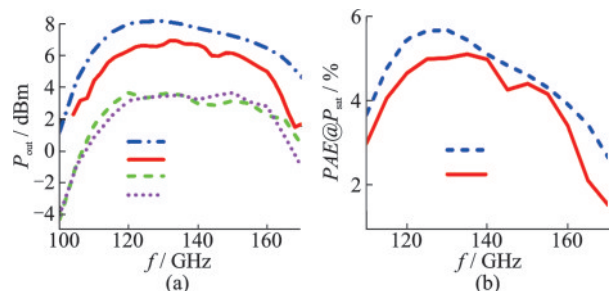


图15 D波段LNPA的仿真和测试结果: (a) 大信号输出特性; (b) 饱和功率处PAE

Fig.15 Simulated and measured results of D-band LNPA: (a) Large signal output characteristics; (b) PAE at saturated power

文献[28]中给出了一款D波段收发芯片模组,如图16所示为D波段高速通信测试平台及包含PCB天线的D波段收发芯片模组的实物照片。图17为D波段收发芯片模组在空口距离6 cm情况下,16/20 Gbps速率时的测试眼图结果。

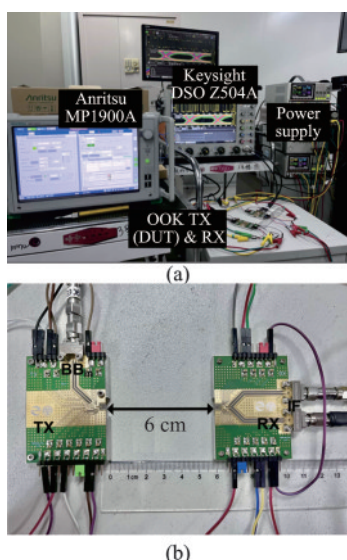


图16 (a)D波段高速通信测试平台;(b)D波段收发芯片模组(包含PCB天线)

Fig.16 (a) D-band high-speed communication test platform; (b) D-band transceiver chip module (Including antenna PCB)

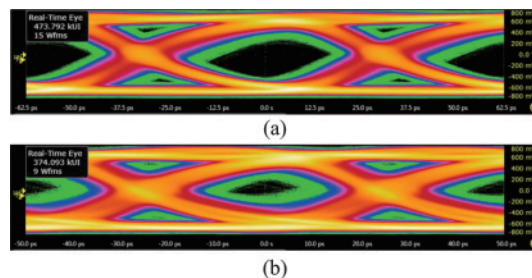


图17 D波段收发芯片模组空口距离6 cm,不同速率时的实测眼图: (a) 16 Gbps; (b) 20 Gbps

Fig.17 Measured eye diagrams of D-band transceiver chip module with air interface distance of 6 cm and different rates: (a) 16 Gbps; (b) 20 Gbps

4 结束语

鉴于太赫兹频段在下一代高速通信中的广阔应用前景,以及近年来硅基工艺的迅速发展,采用硅基半导体工艺实现太赫兹芯片系统成为未来太赫兹无线通信收发系统的主流方案之一。本文简要综述了基于先进硅基工艺的太赫兹发射机芯片的一些研究进展,包括三种典型发射机架构的直接上变频发射机、滑动中频发射机、直接调制发射机,将为我国下一代太赫兹通信提供器件支撑。

参 考 文 献

- [1] 洪伟,余超,陈继新,等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1086-1107.
- [2] 洪伟,陈喆,周培根,等. 毫米波太赫兹集成电路与工艺[J]. 微波学报, 2023, 39(5): 1-18.
- [3] Song H J, Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1: 256-263.
- [4] Rappaport T S. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019, 7: 78729-78757.
- [5] Jastrow C, Munter K, Piesiewicz R, et al. 300 GHz channel measurement and transmission system[C]. 33th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008: 1-2.
- [6] Kissinger D, Kahmen G, Weigel R. Millimeter-wave and terahertz transceivers in SiGe BiCMOS technologies[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(10): 4541-4560.
- [7] Rasilainen K, Phan T D, Berg M, et al. Hardware aspects of sub-THz antennas and reconfigurable intelligent surfaces for 6G communications[J]. IEEE Journal on

- Selected Areas in Communications, 2023, 41 (8) : 2530-2546.
- [8] Akyildiz I F, Han C, Hu Z, et al. Terahertz band communication: an old problem revisited and research directions for the next decade [J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(6): 4250-4285.
- [9] Song H J, Lee N. Terahertz communications: challenges in the next decade [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2022, 12(2): 105-117.
- [10] Crowe T W, Deal W R, Schröter M, et al. Terahertz RF electronics and system integration [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(6): 985-989.
- [11] Elayan H, Amin O, Shihada B, et al. Terahertz band: the last piece of RF spectrum puzzle for communication systems [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 1: 1-132.
- [12] Chen Z, Han C, Wu Y Z, et al. Terahertz wireless communications for 2030 and beyond: a cutting-edge frontier [J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59 (11): 66-72.
- [13] Sariaeddeen H, Saeed N, Al-Naffouri T Y, et al. Next generation terahertz communications: a rendezvous of sensing, imaging, and localization [J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(5): 69-75.
- [14] Song H J. Terahertz wireless communications: recent developments including a prototype system for short-range data downloading [J]. IEEE Microwave Magazine, 2021, 22(5): 88-99.
- [15] Han C, Yan L, Yuan J. Hybrid beamforming for terahertz wireless communications: challenges, architectures, and open problems [J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(4): 198-204.
- [16] Kissinger D, Kahmen G, Weigel R. Millimeter-wave and terahertz transceivers in SiGe BiCMOS technologies [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(10): 4541-4560.
- [17] Heydari P. Terahertz integrated circuits and systems for high-speed wireless communications: challenges and design perspectives [J]. IEEE Open Journal of the Solid-state Circuits Society, 2021, 1: 18-36.
- [18] Eissa M H, Malignaggi A, Wang R, et al. Wideband 240-GHz transmitter and receiver in BiCMOS technology with 25-Gbit/s data rate [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2018, 53(9): 2532-2542.
- [19] Karakuzulu A, Ahmad W A, Kissinger D, et al. A four-channel bidirectional D-band phased-array transceiver for 200 Gb/s 6G wireless communications in a 130-nm BiCMOS technology [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2023, 58(5): 1310-1322.
- [20] D'heer C, Reynaert P. A 135 GHz 32 Gb/s direct-digital modulation 16-QAM transmitter in 28 nm CMOS [C]. 2022 IEEE 48th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC). Milan, Italy: IEEE, 2022: 481-484.
- [21] Strömbeck F, Yan Y, Zirath H. A beyond 100-Gbps polymer microwave fiber communication link at D-band [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2023, 70(7): 3017-3028.
- [22] Tokgoz K K, Maki S, Pang J, et al. A 120 Gbs 16QAM CMOS millimeter-wave wireless transceiver [C]. 2018 IEEE International Solid-state Circuits Conference (ISSCC). San Francisco: IEEE, 2018: 168-170.
- [23] Callender S, Agrawal A, Whitcombe A, et al. A fully integrated 160-Gb/s D-band transmitter achieving 1.1-pJ/b efficiency in 22-nm FinFET [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2022, 57(12): 3582-3598.
- [24] Peng Q P, Jia H K, Fang R, et al. A 26-Gb/s 140-GHz OOK CMOS transmitter and receiver chipset for high-speed proximity wireless communication [C]. 2023 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 145-148.
- [25] Zhou P G, Chen J X, Yan P P, et al. A 150-GHz transmitter with 12-dBm peak output power using 130-nm SiGe: C BiCMOS process [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68 (7) : 3056-3067.
- [26] Li Z K, Chen J X, Li H B, et al. A 220-GHz sliding-IF quadrature transmitter and receiver chipset for high data rate communication in 0.13- μm SiGe BiCMOS [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2023, 58(7): 1913-1927.
- [27] Tang D W, Xia X Y, Yan Z, et al. 24.1 A 90-to-180 GHz APD-integrated transmitter achieving 18 dBm P_{sat} in 28 nm CMOS [C]. 2024 IEEE International Solid-state Circuits Conference (ISSCC). San Francisco: IEEE, 2024: 3-5.
- [28] Zhang R, Tang D W, Chen Z, et al. A D-band OOK transmitter with 50-GHz bandwidth achieving 32-Gbps data rate in 28-nm CMOS [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2024, 8(59): 2347-2361.



陈 喆 (CHEN Zhe) 男, 1982 年生, 2006 及 2014 分别于电子科技大学、东南大学获得学士、博士学位。2016—2018 年于美国德克萨斯大学博士后研究, 现任东南大学信息科学与工程学院毫米波国家重点实验室副教授。主要研究方向为硅基毫米波太赫兹集成电路与系统等。