

文章编号: 2095-4980(2021)05-0753-16

硅基太赫兹技术及未来趋势

张 蕾, 傅海鹏, 孟凡易, 王科平, 马凯学*

(天津大学 微电子学院, 天津 300072)

摘 要: 不同于传统的太赫兹组件, 基于硅基的太赫兹系统在大规模使用情况下具有成本低, 尺寸小, 集成度高, 操作性强, 更容易实现大阵列等特点。近 10 年来, 随着硅基半导体技术的快速发展和硅基工艺晶体管的截止频率提升, 硅基太赫兹系统芯片的设计发展迅猛。本文将主要从硅基太赫兹源、硅基太赫兹成像芯片、硅基太赫兹通信芯片、硅基太赫兹雷达芯片四个方面对当前的硅基太赫兹系统芯片的研究现状和发展趋势进行综述。

关键词: 硅基; 太赫兹; 成像; 通信; 雷达

中图分类号: TN43; TN95

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021252

Silicon-based terahertz technologies and future trends

ZHANG Lei, FU Haipeng, MENG Fanyi, WANG Keping, MA Kaixue*

(School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Being different from traditional terahertz components, silicon-based terahertz systems have the characteristics of low cost, small size, high integration, great maneuverability, and easier implementation of large arrays for large volume adoption. In the past ten years, with the rapid development of semiconductor technology and the increase of the cut-off frequency of silicon-based process transistors, the field of silicon-based terahertz system chip design has developed rapidly. The current research status and development trends of silicon-based terahertz system chips from four aspects: silicon-based terahertz sources, silicon-based terahertz imaging chips, silicon-based terahertz communication chips, and silicon-based terahertz radar chips are reviewed in this paper.

Keywords: silicon-based; terahertz; imaging; communication; radar

太赫兹(Terahertz, THz)波通常是指频率在 0.1~10 THz, 位于微波和红外之间的电磁波谱^[1]。太赫兹波具有很多独特的性质, 如光子能量低、穿透性高、带宽大等特点。因此, 太赫兹技术在安全检测、无损检测、医学和生物学等领域具有较好的应用前景, 其相关的器件、电路及系统技术受到广泛关注。

当前可用的太赫兹器件及系统的实现方式分为基于纯电子器件和基于光电两种方式。基于纯电子器件的解决方案主要依赖于肖特基二极管和 III-V 族器件的波导组件或是微加工的热辐射计阵列; 基于光电实现方式中最具代表性的为量子级联激光器。这些太赫兹系统在实际使用中成本高昂, 体积庞大^[2], 有些情况下需要冷却设备辅助, 同时与传统的微电子封装不兼容, 因此主要用于性能驱动相关的市场。

近年来, 随着硅基工艺的快速发展, 基于硅基工艺实现的太赫兹集成电路芯片引起了人们的研究兴趣^[3], 它具有低成本、低功耗和小尺寸等特点, 能够满足低成本和高集成度的商业市场化需求。发展方向包括硅基太赫兹源、硅基太赫兹成像芯片、硅基太赫兹通信芯片和硅基太赫兹雷达芯片等。本文围绕这些研究方向近期的发展现状进行总结, 较完整地综述相关技术进展情况, 希望对本领域的研究人员产生启发意义。

1 硅基工艺太赫兹源

传统的太赫兹电路使用高度优化的 III-V 族工艺实现。随着半导体工艺的发展, 基于商用硅基工艺的太赫

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-08-04

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB2202500)

*通信作者: 马凯学 email:makaixue@tju.edu.cn

兹电路已成为现实。作为太赫兹系统最重要的一部分，紧凑且低成本的太赫兹源受到了广泛关注^[4]。当太赫兹源的工作频率远高于商用硅基晶体管的 f_{max} ，晶体管开始出现功率损耗，需要利用晶体管的强非线性来拓展其工作频率^[5-8]。非线性前端电路主要包括谐波 N 推振荡器和倍频器。图 1(a)为典型的双推振荡器，其中 2 个交叉对管产生一对差分基频信号 f_0 ，在虚拟接地点基波彼此抵消，二次谐波为同向信号，在虚拟接地点处叠加，从而实现 $2f_0$ 的信号输出。该方法可根据谐波叠加关系拓展到 N-推振荡器。图 1(b)为基于倍频原理在 65 nm CMOS 工艺下实现的 1.4 THz 太赫兹源，它结合对称的 MOS 变容管(Symmetric MOS VARactors, SVARs)和非对称的变容管(ASymmetric VAR, ASVAR)将 140 GHz 信号分别经过五次倍频和二次倍频到 1.4 THz。

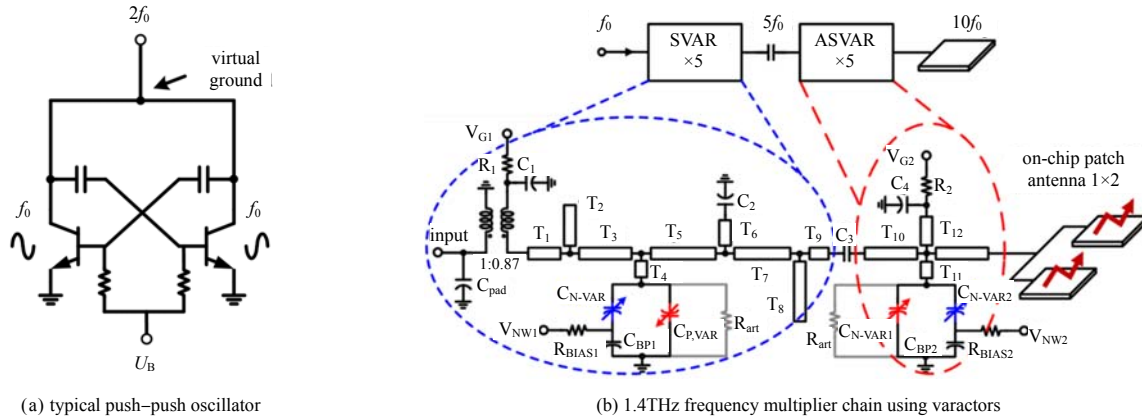


Fig.1 Realization of terahertz source
图 1 太赫兹源的实现

以上两种方法的损耗会随着谐波次数和驱动频率的增加而迅速增加^[9]，要在该频段产生高的输出功率是非常具有挑战性的。为提升辐射功率，采用多天线或多阵列的源实现空间功率合并。在参考文献[10]中，将 4 个天线放置在芯片的中间，并分别由芯片外围的 4 个倍频链路进行驱动，工作频率为 820 GHz，输出功率为 -29 dBm。但这种中心化的版图结构如果向更大规模发展，需要额外的信号链路来辅助，这将大大增加系统的复杂性和损耗。为拓展阵列规模，2018 年，麻省理工学院基于去中心化概念，采用耦合相干谐振子阵列实现包含 91 个天线的大阵列^[6]，如图 2 所示，在 1.01 THz 频率下实现了 -10.9 dBm 的输出功率。

值得注意的是，目前还没有最好的一个架构出现，具体的实现架构需要在频率和整体源的性能之间进行方案论证和平衡。图 3 为目前的 200 GHz 以上 CMOS 和 SiGe HBT 辐射源的当前技术水平^[4,11-14]。

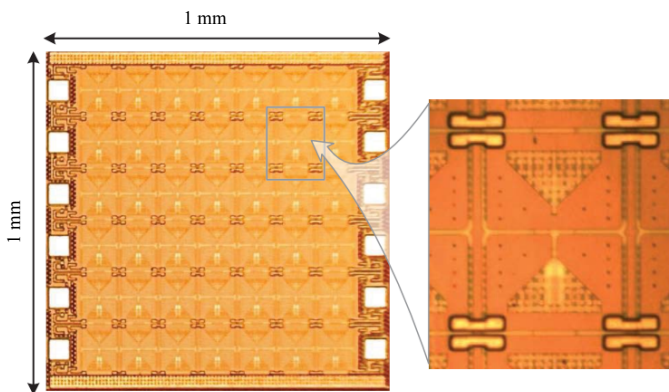


Fig.2 1.01 THz radiation array containing 91 dipole slot antennas
图 2 集成 91 个偶极缝隙天线的 1.01 THz 辐射阵列

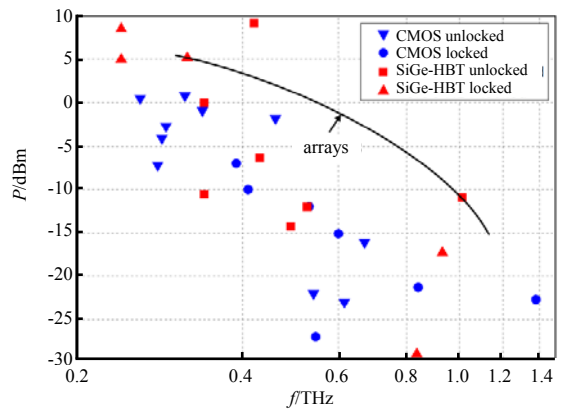


Fig.3 Comparison of output power and architectures of THz radiators in silicon
图 3 基于硅基工艺太赫兹辐射源的输出功率对比

2 硅基太赫兹成像芯片

太赫兹波穿透能力强，能量低，安全性高。与 X 射线相比，太赫兹光子能量低，在 1 meV 量级，远低于人体安全阈值。同时，与微波相比，太赫兹波具有极高的“空时频”分辨力，成像分辨力高，能够对目标特征进

行精细刻画。这些属性使太赫兹在危险品和藏匿物品的探测成像、药品成像、材料表征等安全检查和无损检测等应用中具有非常大的优势。近年来，太赫兹成像尤其是基于硅基工艺的成像芯片逐渐成为研究热点。

2010 年，佛罗里达大学基于 130 nm logic CMOS 工艺研制了工作频率为 280 GHz 的 2×2 肖特基势垒二极管检测器阵列^[15]，如图 4(a)所示。该探测器在没有放大器的情况下测试得到的响应度为 $70 \text{ V/W}@280 \text{ GHz}$ ，噪声等效功率(Noise Equivalent Power, NEP)为 $40 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 。但在测试时，该探测器响应度随频率波动明显，峰值也比仿真小三倍以上。基于此，该团队在 2011 年将源的功率由 $82 \mu\text{W}$ 提高到 29 mW 重新进行测试^[16]，测试方案如图 4(b)所示。测试得到的响应度为 80 kV/W ，在不采用片上放大的情况下响应度为 250 V/W ，与仿真结果吻合很好，如图 4(c)所示。实验验证可以检测出隐匿的塑料环、橡胶和刀片等，如图 4(d)所示。在实际测量中，锁定技术只利用了阵列中有限数量的像素，获取光栅扫描太赫兹图像的速率非常慢。2012 年，德国伍珀塔尔大学基于 65 nm CMOS 工艺研制出室温下拥有 1k 像素(32×32 像素阵列)的太赫兹摄像机芯片^[17]，如图 5 所示，可用于 $0.7\sim 1.1 \text{ THz}$ 的成像。该设计基于分布式电阻自混频的原理，可以实现远高于截止频率的太赫兹检测，且功耗很低，利于大阵列的实现。芯片由 1 024 个差分片上环形天线和 NMOS 直接检测器组成，同时结合行列选择以及集成和转储电路，可捕获高达 500 fps 的太赫兹视频，如图 5(d)所示。当工作频率为 856 GHz 时，每个像素可以实现的最大响应度为 140 kV/W ，NEP 为 $100 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 。

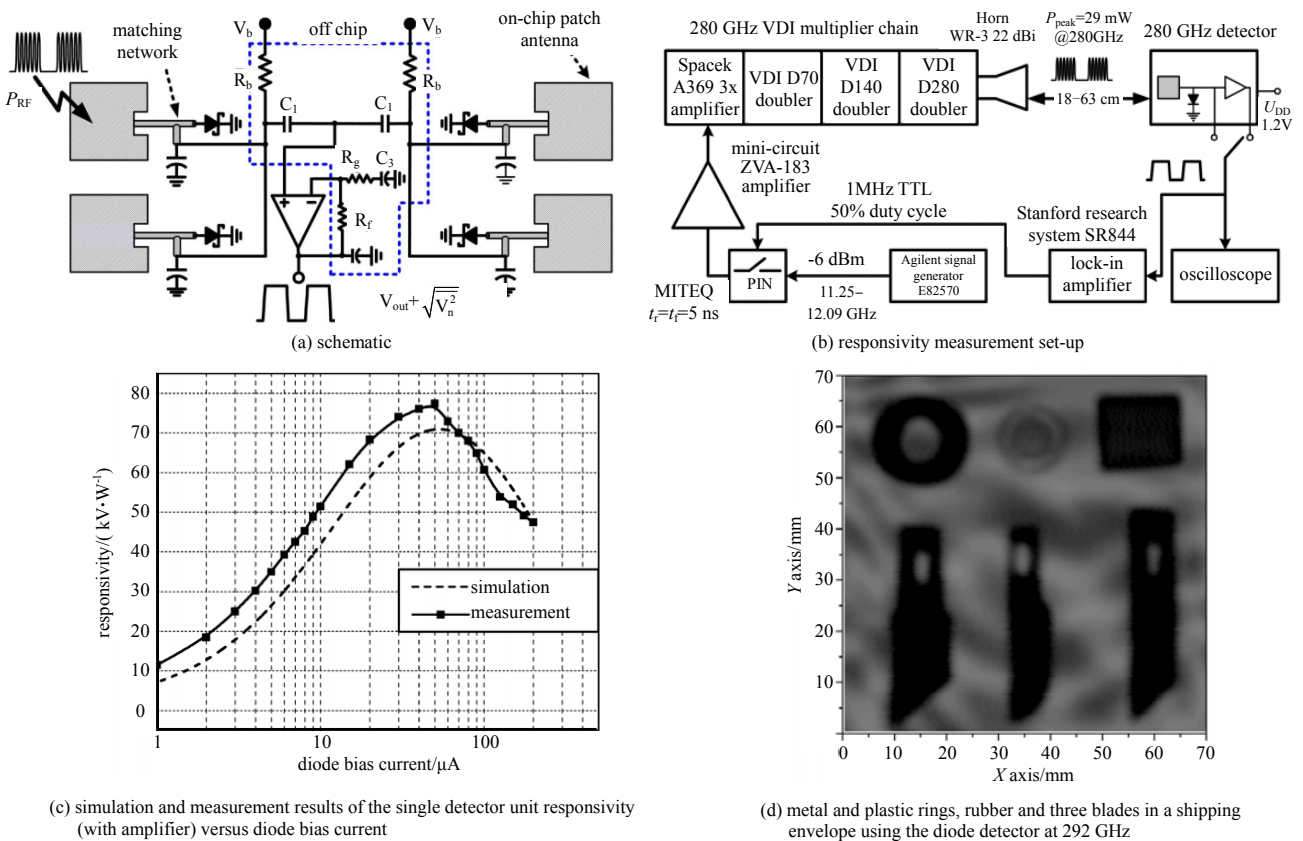


Fig.4 280 GHz Schottky diode detector
图 4 280 GHz 肖特基二极管检波器

以上基于二极管和 NMOS 都属于非相干的直接检测，灵敏度低。此外，在实际测试中，这种检测方式对太赫兹源的输入功率要求大^[15-17]，对固态电子产品也极具挑战性。这个问题可以使用相干检测的方法进行缓解。2016 年，康奈尔大学基于 $0.13 \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 工艺研制出一组工作在 320 GHz 的高灵敏度相干成像收发器芯片。在该团队已经发表的 3.3 mW 的 320 GHz 锁相发射太赫兹源的基础上^[18-19]，本次设计中的发射机芯片由工作在 320 GHz 的 4×4 辐射阵列和一个 160 GHz 的锁相环(Phase Lock Loop, PLL)组成^[20]，见图 6。其中每行的 4 个辐射器相互耦合实现频率源同步；接收芯片由工作在 320 GHz 的 8 单元检测器阵列和一个类似的 160 GHz 的 PLL 组成。通过比较，相干成像仪的灵敏度可提升 10 倍以上。

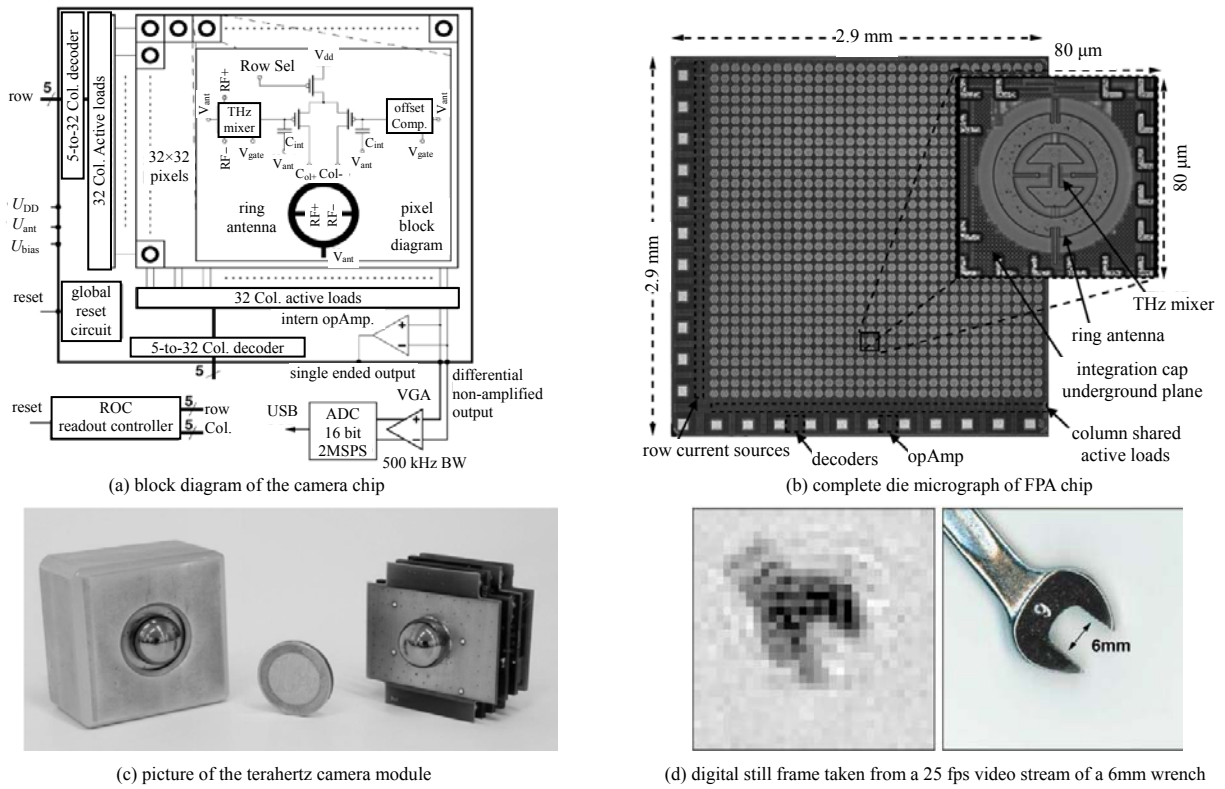


Fig.5 32×32 imaging array
图 5 32×32 成像阵列

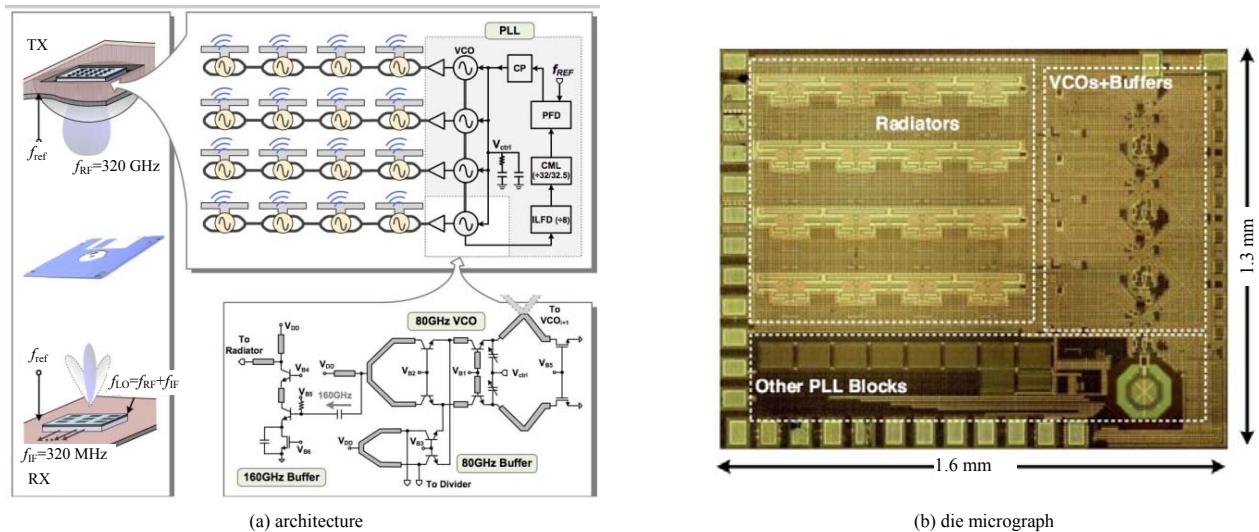


Fig.6 320 GHz transmitter for heterodyne imaging systems
图 6 320 GHz 外差成像系统发射机

为实现更高的分辨力成像，基于相干成像的阵列的规模也逐渐扩大。但传统的相干检测阵列中的本振信号大多采用中心化设计，很不利于阵列规模的扩大。2019 年，美国的麻省理工学院采用单元内本地振荡器生成的去中心化架构^[21]，如图 7(a)所示，基于 65 nm CMOS 工艺在 240 GHz 实现了集成 32 个单元的锁相密集外差接收阵列。该阵列基于强耦合的二维本振网络，只需平铺更多的接收像素便可实现大阵列。需要注意的是，与之前规模和密度相当的平方律检测器阵列相比，该芯片实现的灵敏度提高约 4 300 倍。同时，该芯片的每个接收单元的尺寸很小，仅为 $\lambda_{240 \text{ GHz}}/4 \times \lambda_{240 \text{ GHz}}/2$ ，这样就允许在 1.2 mm^2 的芯片范围内集成 2 个交错的 4×4 阵列，同时控制 2 个独立的波束。这使得整个接收机阵列更加紧凑，如图 7(b)所示，每个像素的功能也更多。

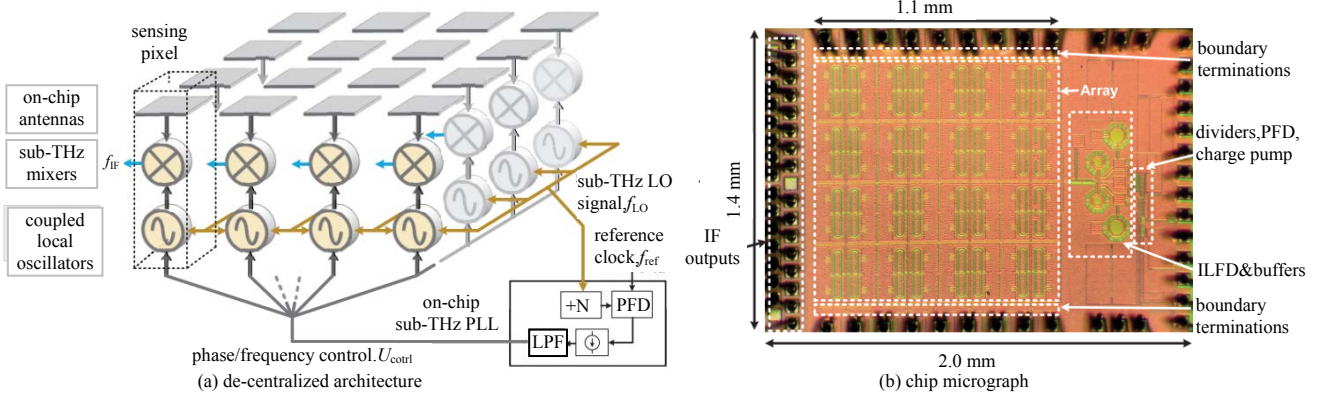


Fig.7 32-unit terahertz heterodyne sensor array
图 7 32 单元太赫兹外差传感器阵列

同时，也有一些研究致力于提高成像的横向分辨力。2019 年，康奈尔大学基于 55 nm BiCMOS 工艺研制出一款完全集成的超宽带具有高分辨力的 220 GHz 逆合成孔径成像雷达^[22]，图 8(a)~(b)为整个系统的实现框架和版图。该成像系统在发射端通过对核心晶体管周围的无源进行优化，使压控振荡器的调谐带宽达到 62.4 GHz，相对带宽比为 28.2%；在接收端采用次谐波混频器，降低转换损耗，使中频幅度最大化。此外，为获得精细的横向分辨力，该成像系统结合近场波束形成算法，合成波束宽度可小于 0.5°。结合图 8(c)~(d)，经过实验验证，对于距离 23 cm 的物体，系统可实现 2 mm 的横向分辨力和 2.7 mm 的距离分辨力，如图 8(e)~(f)所示。

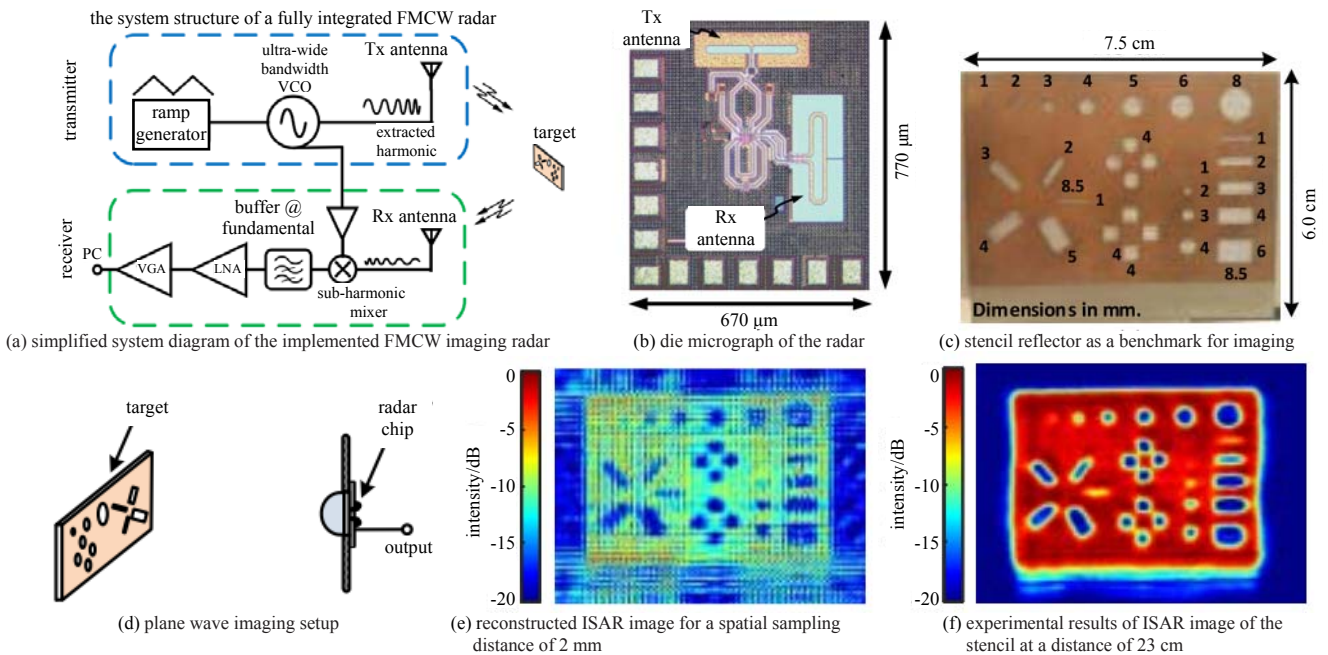


Fig.8 220 GHz radar
图 8 220 GHz 雷达

迄今为止，在太赫兹成像分辨力方面取得了多项技术突破，但硅集成太赫兹成像器的分辨力一直受到衍射极限的限制，只能达到毫米范围的光斑尺寸。生物医学或材料表征中的许多应用需达到微米级分辨力，这可以通过从远场到近场成像来实现。2016 年，德国的伍珀塔尔大学提出一种突破衍射极限的室温操作的超分辨力太赫兹平面近场传感器^[23]。近场成像主要基于传感器表面有与没有成像物体两种状态实现绝对差异的测量，如图 9(a)所示。此设计基于商用 130 nm SiGe HBT 工艺实现，工作频率为 533~555 GHz，结合图 9(b)中的片上谐振器可以解析微米范围内的结构细节，在读出部分没有放大器的情况下可以实现高达 21.7 μA 的响应，整体近场成像电路如图 9(c)所示。需要注意的是，该系统集成了照明和探测，在使用中无需使用任何外部光学元件。与近场扫描光学显微镜解决方案相比，它具有中等的探测器灵敏度和有限的照明功率，但它实现了 μm 范围的横向

分辨力，同时具有高响应和高动态范围。经过实验对比验证，不论是金属还是电介质物体，该系统都可以实现很好的成像。2018 年，该团队结合实际应用需求，基于同样的工艺，将参考文献[23]中的太赫兹平面近场传感器拓展为 128 像素具有超分辨力的 THz 近场成像仪^[24]，分辨力可达到 10~12 μm ，如图 10(a)~(d)所示。同时，该成像阵列还集成了传感器照明、近场传感、检测以及实时图像采集的读出电路。其中，每个像素最大的读出时间为 280 μs 。

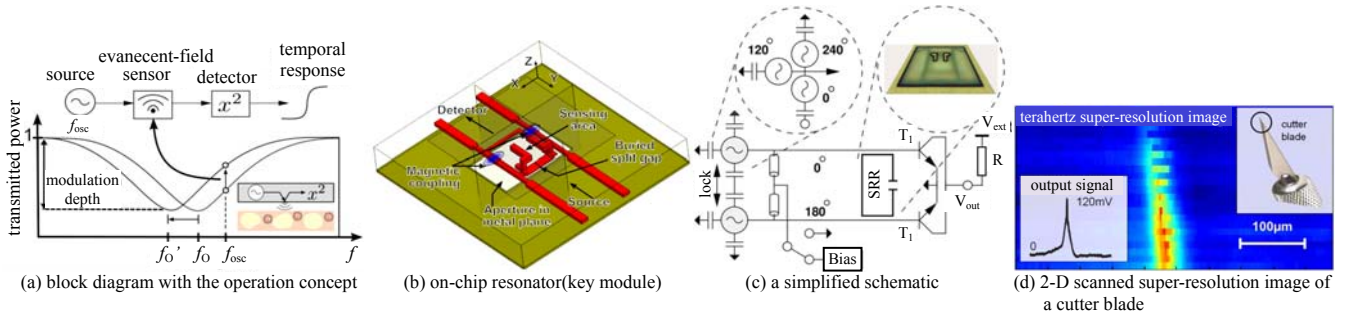


Fig.9 Near-field sensor
图 9 近场传感器

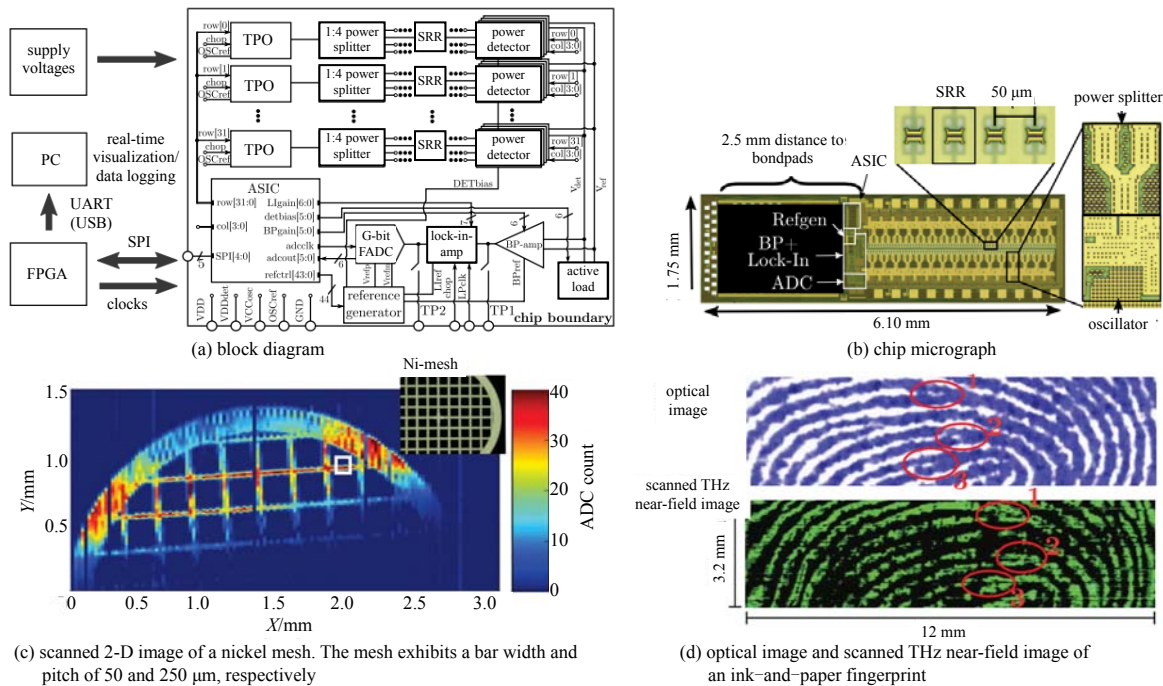


Fig.10 128-pixel SoC
图 10 128 像素片上系统

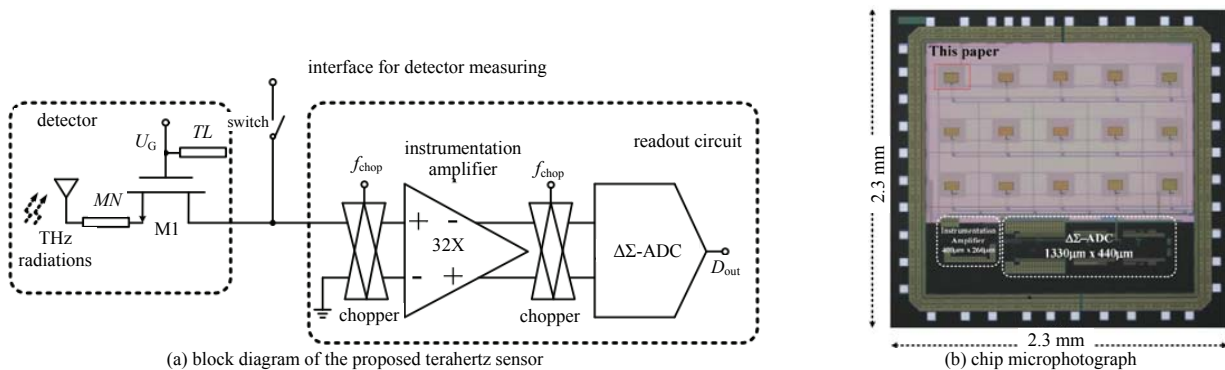


Fig.11 Fully-integrated 860 GHz sensor
图 11 全集成的 860 GHz 传感器

在我国，中国科学院半导体研究所基于硅基工艺实现了多款太赫兹成像芯片。2015 年，基于标准的 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺实现了工作频率为 $860\ \text{GHz}$ 的全集成太赫兹传感器^[25]。该系统集成了一个单 NMOS THz 检测器、一个低噪声斩波仪表放大器 and 具有千分辨力的 $\Delta\Sigma$ -ADC，如图 11 所示。其中，检测器由一个新型片上接地贴片天线和一个具有最小尺寸的源极馈电 NMOS 场效应晶体管组成。在 $860\ \text{GHz}$ 下，该检测器的电压响应度为 $3.3\ \text{kV/W}$ ，NEP 为 $106\ \text{pW/Hz}^{1/2}$ 。2017 年，该团队基于 $65\ \text{nm}$ CMOS 工艺实现了工作频率为 $3\ \text{THz}$ 的探测器^[26]。该探测器在室温下的电压响应度为 $526\ \text{V/W}$ ，NEP 为 $73\ \text{pW/Hz}^{1/2}$ 。利用光栅扫描技术获得了牙签的高分辨力成像效果，如图 12 所示。

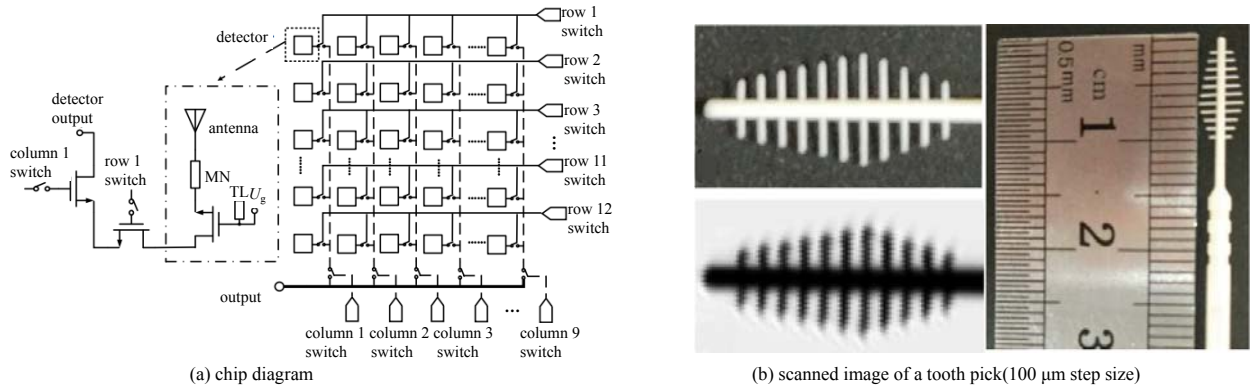


Fig.12 3 THz detector
图 12 3 THz 的探测器

3 硅基太赫兹通信芯片

与微波相比，太赫兹波具有很宽的瞬时带宽。太赫兹通信传输的速率高、容量大，可提供 Gbps 至 100 Gbps 甚至更高的无线传输速率，这是目前微波通信无法实现的。同时太赫兹具有很好的穿透沙尘烟雾的能力，可在恶劣环境下进行正常通信。由于太赫兹波长短，太赫兹器件、天线和系统可以做得更小更紧凑。尤其是基于硅基工艺的太赫兹通信系统在成本和兼容性上更加适应未来快速发展的市场化需求。

2016 年，德国伍珀塔尔大学基于 $0.13\ \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 工艺实现了一款工作在 $240\ \text{GHz}$ 全集成的直接变频正交发射机和接收机芯片组^[27]。为实现宽的通信系统，宽带的信号源和片上天线是非常重要的部分。如图 13(a) 所示，在信号源上，该设计采用 16 倍频的方案，同时为了拓展本振链路的 3 dB 带宽和获得更平滑的滚降，对 4 个级联的二倍频在频率上进行交错调谐。在天线上，前端辐射天线的带宽受到与金属反射面的距离(通常为几 μm)限制，但通过硅衬底的背面辐射的天线带宽没有限制，且尺寸也大大减小。因此，系统采用背面辐射的天线架构，并结合透镜，如图 13(b)所示，减少了表面波对辐射效率和辐射模式的影响，增益显著提高，以补偿自由空间传播损耗。图 13(c)为集成了片上环形天线的发射机和接收机的版图。在 $236\ \text{GHz}$ 频率下，整个系统的峰值饱和功率为 $4.4\ \text{dBm}$ ，有效各向同性辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)为 $21.86\ \text{dBm}$ ，最大测量数据速率为 $2.73\ \text{Gb/s}$ ，测试框架如图 13(d)所示。当调制方式为正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)时，在 $15\ \text{cm}$ 范围内可以实现 10^{-9} 的误码率。图 13(e)为 QPSK、16 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)和 64QAM 三种调制方式对应的星座图。此外，通过配置不同的外部 LO(固定频率或宽调节范围的频率)，芯片的功能还可以被拓展，如用于材料识别、成像、调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)雷达。

为进一步提高太赫兹的通信速率，2018年，德国IHP公司基于 $0.13\ \mu\text{m}$ SiGe的工艺在 $240\ \text{GHz}$ 实现了带宽为 $35\ \text{GHz}$ 的宽带发射机和接收机^[28]，如图14(a)所示。它具有 $25\ \text{Gb/s}$ 的传输速率并且支持二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)的调制方式。该芯片的饱和输出功率为 $-0.8\ \text{dBm}$ ，上变频通过改进的吉尔伯特混频器单元对对倍频链路的输出信号进行基波混频，如图14(b)；下变频的第一级采用混频器，该混频器利用跨阻放大器作为负载改善噪声，并拓展系统带宽性能，最小的单边带噪声系数为 $13.4\ \text{dB}$ ，增益为 $32\ \text{dB}$ ，其中控制增益为 $25\ \text{dB}$ 。此外，该系统同时使用宽带片上双折叠偶极子天线和光学透镜，如图14(c)~(d)所示，通过演示实现了 $20\ \text{Gb/s}$ 和 $25\ \text{Gb/s}$ 的传输速率，当传输距离为 $15\ \text{cm}$ 时，所对应的误码率分别为 6.3×10^{-6} 和 2.2×10^{-4} 。其中，发射和接收芯片的功耗分别为 $375\ \text{mW}$ 和 $575\ \text{mW}$ 。目前基于硅基工艺的大于 $300\ \text{GHz}$ 单收发机并不具有可观的传输速率，也无法支持QAM调制。但正如IEEE 802.15.3d所表达的那样，具有QAM调制性能的单芯片CMOS收发机

是未来的发展趋势。2019年,日本广岛大学基于40 nm CMOS工艺研制出一款工作在300 GHz、传输速率高达80 Gb/s、可支持16QAM调制的单芯片收发机^[29]。由于采用的工艺具有相对较低的 f_{\max} ,设计采用了没有PA和LNA的方案,如图15(a)所示。它可以在发射或接收模式下进行工作,如图15(b)~(c)所示。发射部分和接收部分共享发射链路,在接收模式下,发射链路作为本振的倍频链路参与工作。此外,发射和接收模式的前端通过两个Rat-race对信号进行加减,满足系统的要求:即在发射模式下,RF的信号相互叠加,LO²的信号相互抵消;而在接收模式下,LO²相互叠加。由于两个模式共享发射部分,正交调制器需泄露一定的LO至输出,因此不能使用平衡良好的双平衡混频器。为使LO泄漏量可控,该设计提出半平衡正交混频器(Semidoubly-Balanced Quadrature Mixer, SDBQM),如图15(d)所示。它在原理上类似于双平衡混频器,但基带输入不平衡。其中,基带反向端口用于调整输出(α LO+IF)中的系数 α ,从而控制两种模式下LO的性能。这款芯片的发射功率为-1.6 dBm,整体功耗为1.79 W,版图和测试平台分别如图15(e)~(f)所示。

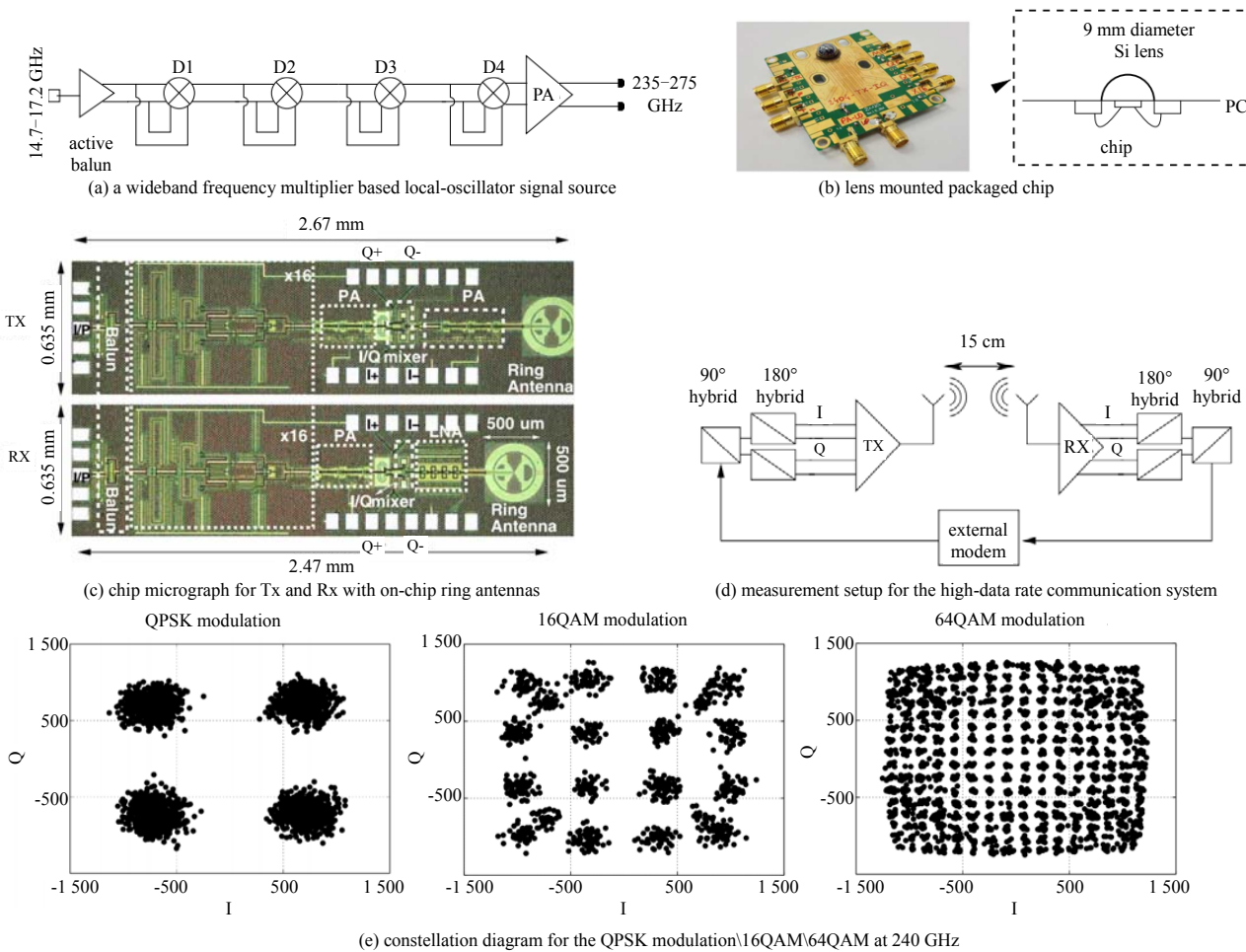


Fig.13 240 GHz communication chip

图 13 240 GHz 通信芯片

此外,2020年,日本东京工业大学基于65 nm CMOS工艺实现了在300 GHz的传输速率为34 Gb/s低功耗无线通信系统^[30]。其中,发射机和接收机的功耗分别为270 mW和140 mW。该系统在发射端采用所提出的具有低转换损耗的三倍频器,如图16(a)所示;在接收端采用具有低转换损耗的推-推次谐波混频器,如图16(b)所示,避免了传统的太赫兹低效率功率合成,从而降低了功耗。整个系统支持QPSK和16QAM的调制,并实现了IEEE 802.15.3中定义的ch.13-23(1.76 Gbaud)、ch.39-43(3.52 Gbaud)、ch.52-53(7.04 Gbaud)和ch.59(10.56 Gbaud)的无线通信,如图16(c)所示。图16(d)为收发机的版图。

国内,2021年,清华大学基于28 nm CMOS工艺实现了工作频率为122~168 GHz的雷达/通信融合多模式收发机^[31],如图17所示。在雷达模式下,射频前端的带宽可达46 GHz。在通信模式下,模拟基带的带宽为20 GHz,镜像抑制比大于40 dB,可支持QPSK和16QAM两种调制方式。其中,使用QPSK和16QAM调制方式对应的误差矢量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)分别为-20.7 dB和-19.7 dB。

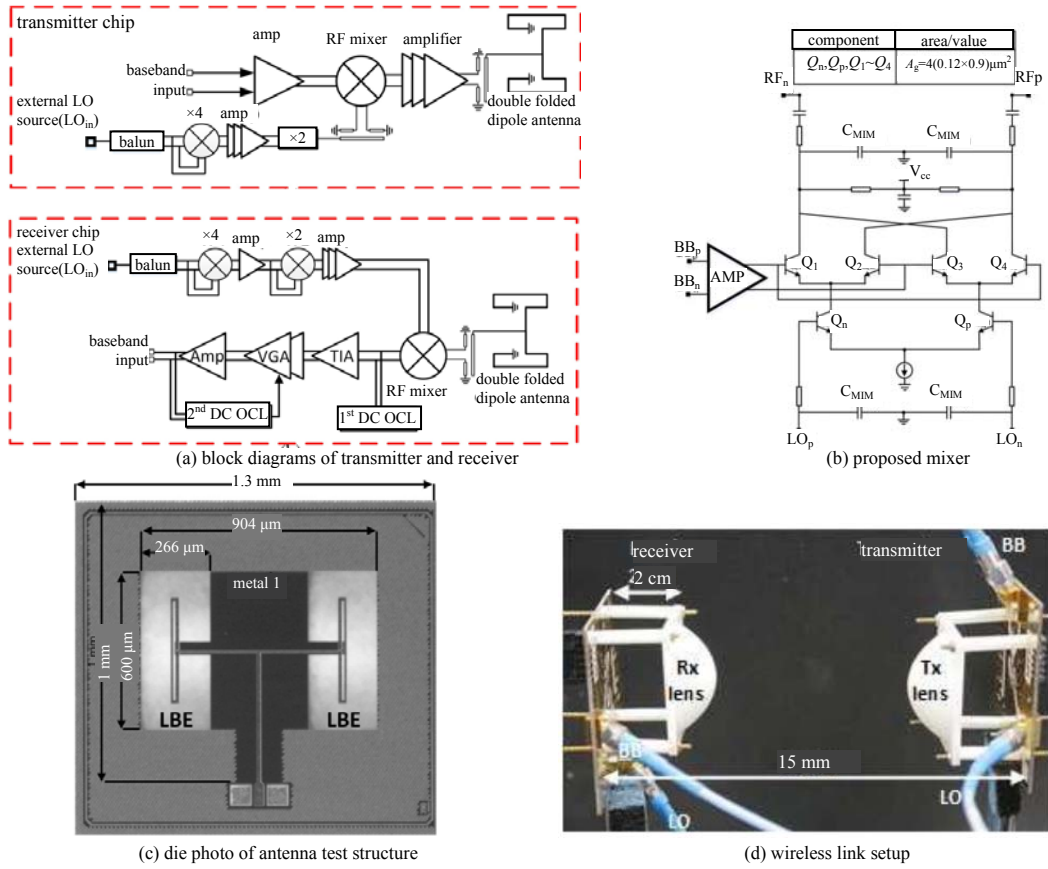


Fig.14 240 GHz communication chip with 25 Gb/s
图 14 传输速率为 25 Gb/s 的 240 GHz 通信芯片

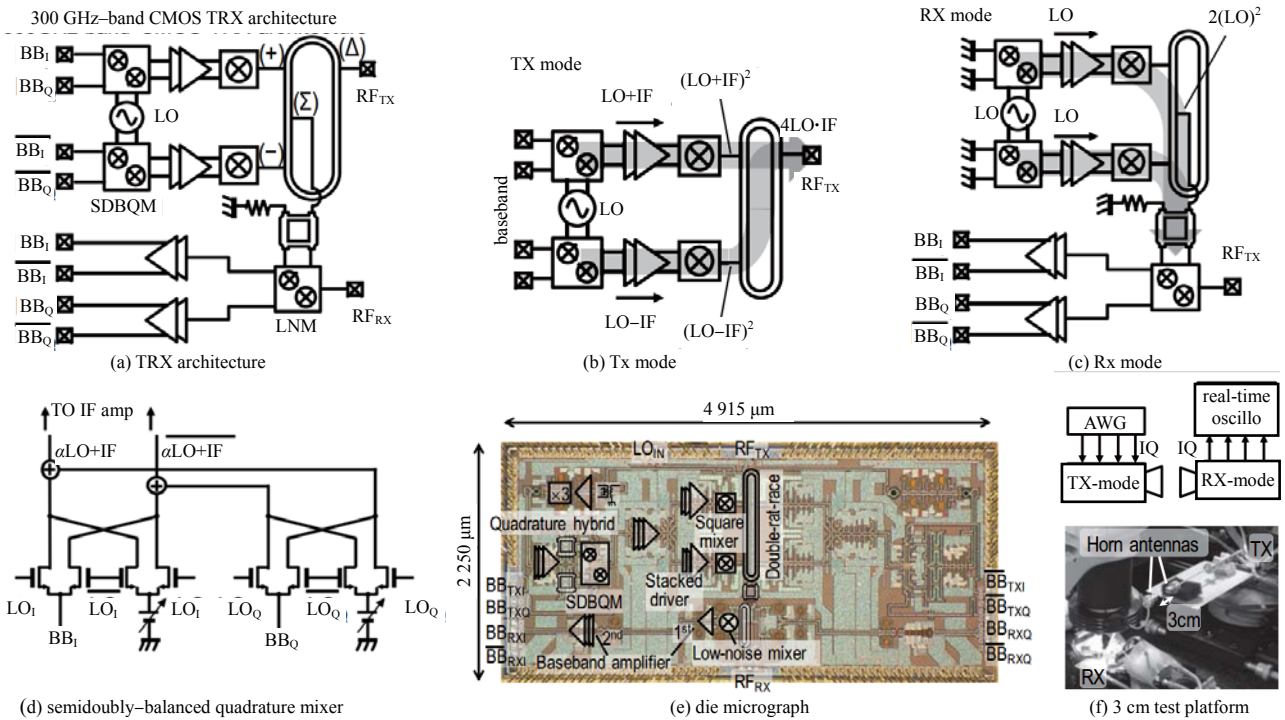


Fig.15 300 GHz single-chip TRX
图 15 300 GHz 单芯片收发机

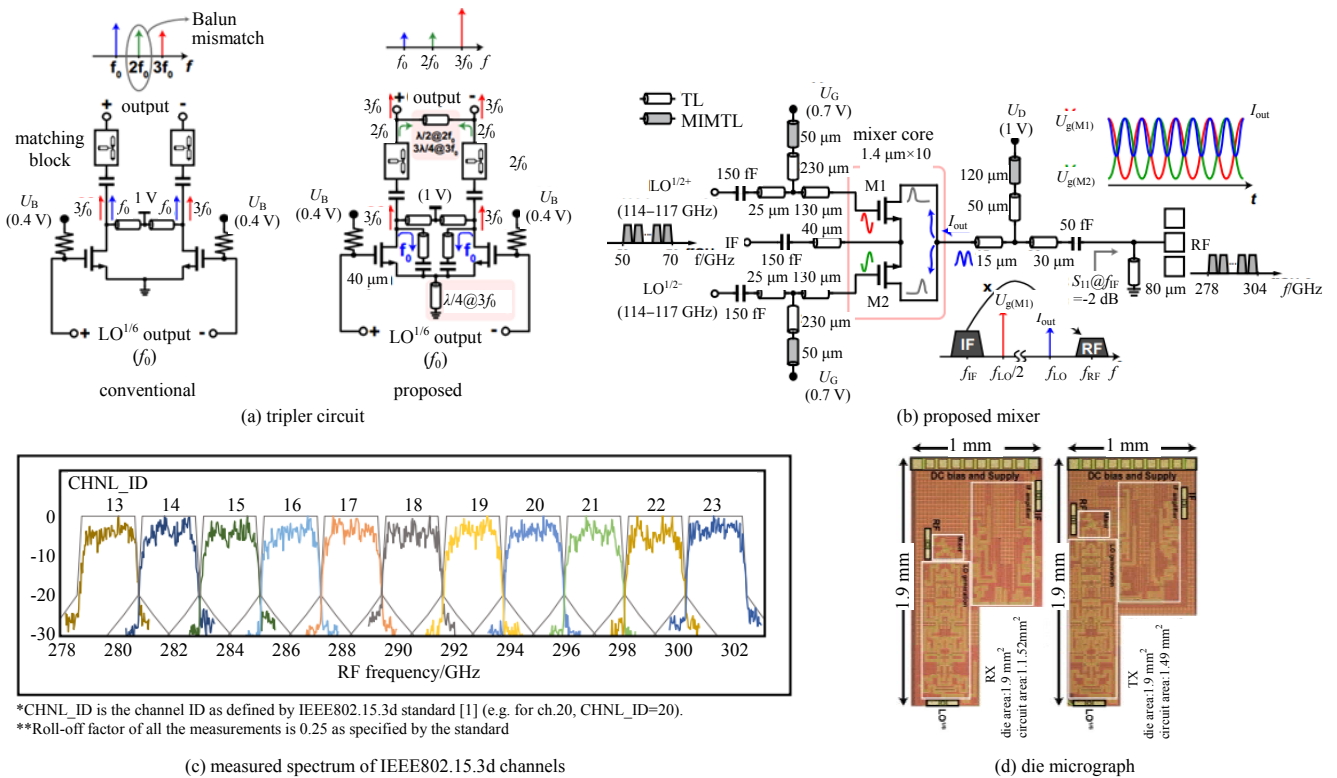


Fig.16 300 GHz TRX for IEEE 802.15.3d
图 16 满足 IEEE 802.15.3d 的 300 GHz 收发机

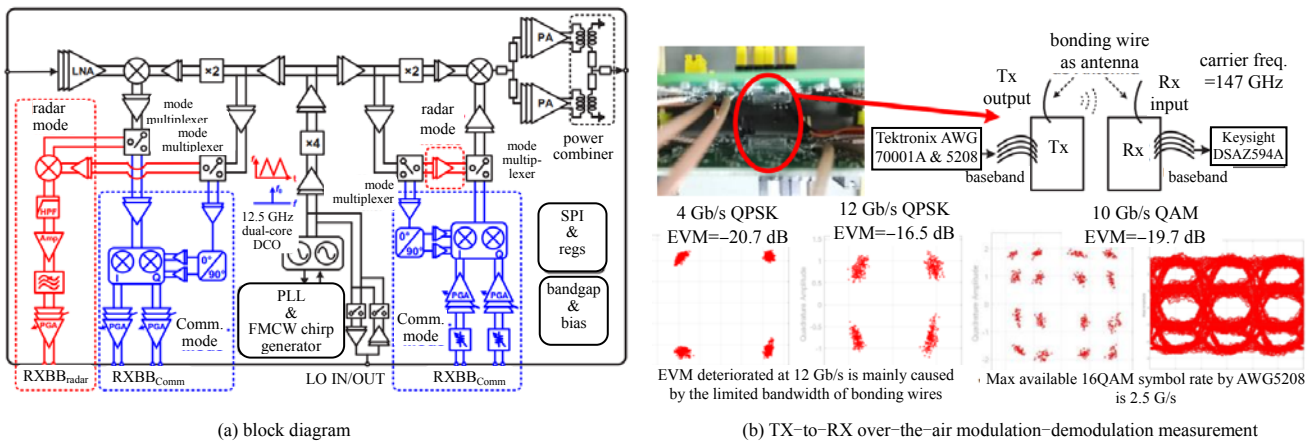


Fig.17 122-168 GHz radar/communication fusion-mode transceiver
图 17 122~168 GHz 雷达/通信融合模式收发器

4 硅基太赫兹雷达芯片

同微波雷达相比，太赫兹波雷达的目标分辨率更高，同时可以获取更加丰富的目标信息，探测比微波雷达更小的目标和实现更精确的定位，是未来高精度雷达的发展方向。同时太赫兹频段具有很多的绝对带宽可用，且波长小，天线尺寸紧凑，与硅基工艺结合兼容性很好、集成度高、大阵列、高分辨率力的太赫兹雷达芯片是未来的发展方向，可以更好地满足自适应巡航控制和类似技术的要求。

2017 年，UC Berkeley 基于 130 nm SiGe BiCMOS 工艺实现了一款工作在 94 GHz 的 4 发 4 收高度集成的相控阵 FMCW 雷达芯片^[32]，如图 18(a)~(b)所示。该收发机针对移动设备的手势识别应用，在保证相控阵 FMCW 链路预算的基础上可降低直流功耗。其中，每个发射单元的功耗为 106 mW，每个接收单元的功耗为 91 mW，测试表明每个单元的输出功率为 6.4 dBm，在 94 GHz 处的单边带噪声系数为 12.5 dB。同时结合紧凑的封装天

线模组，如图 18(c)所示，该阵列能够实现 $\pm 20^\circ$ 的波束控制范围，同时可以保持主瓣与旁瓣至少 3 dB。通过对完整的芯片天线模块进行测试，可以表征基本的 FMCW 雷达功能。最初的雷达实验也表明：3.68 GHz 射频扫描带宽可以实现低于 5 cm 的距离分辨率，这与理论预测一致，如图 18(d)所示。

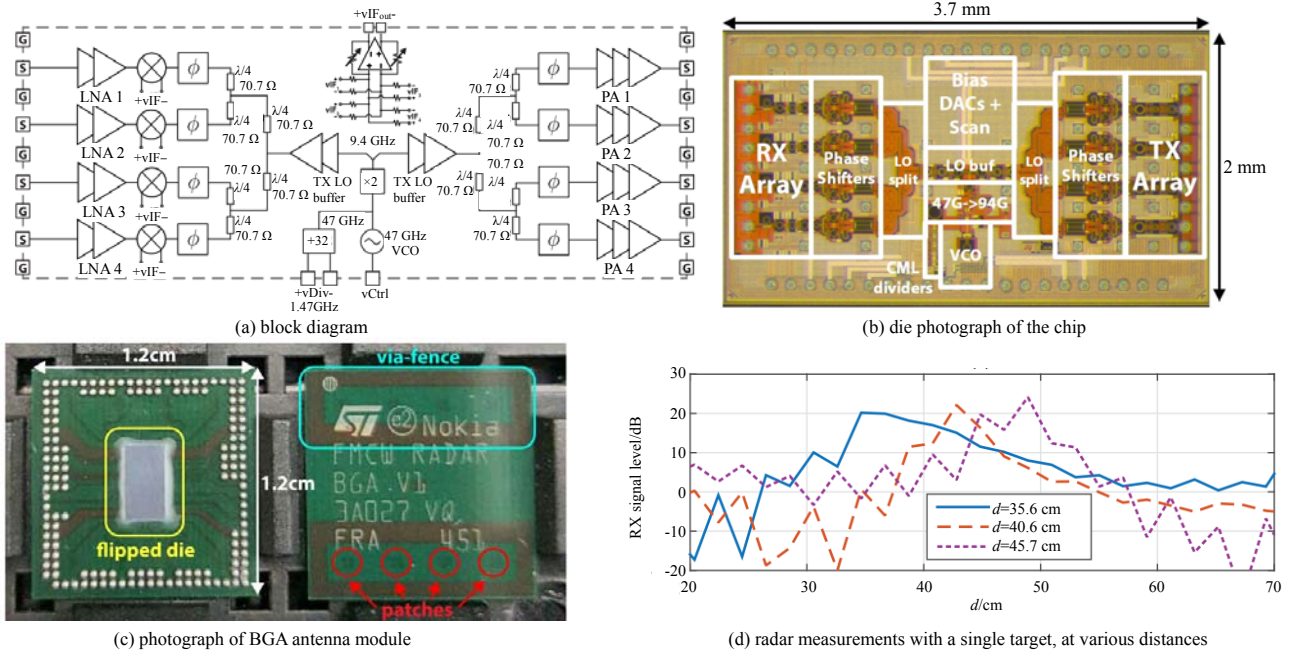


Fig.18 94 GHz 4Tx-4Rx phased-array radar
图 18 94 GHz 四发四收相控阵雷达

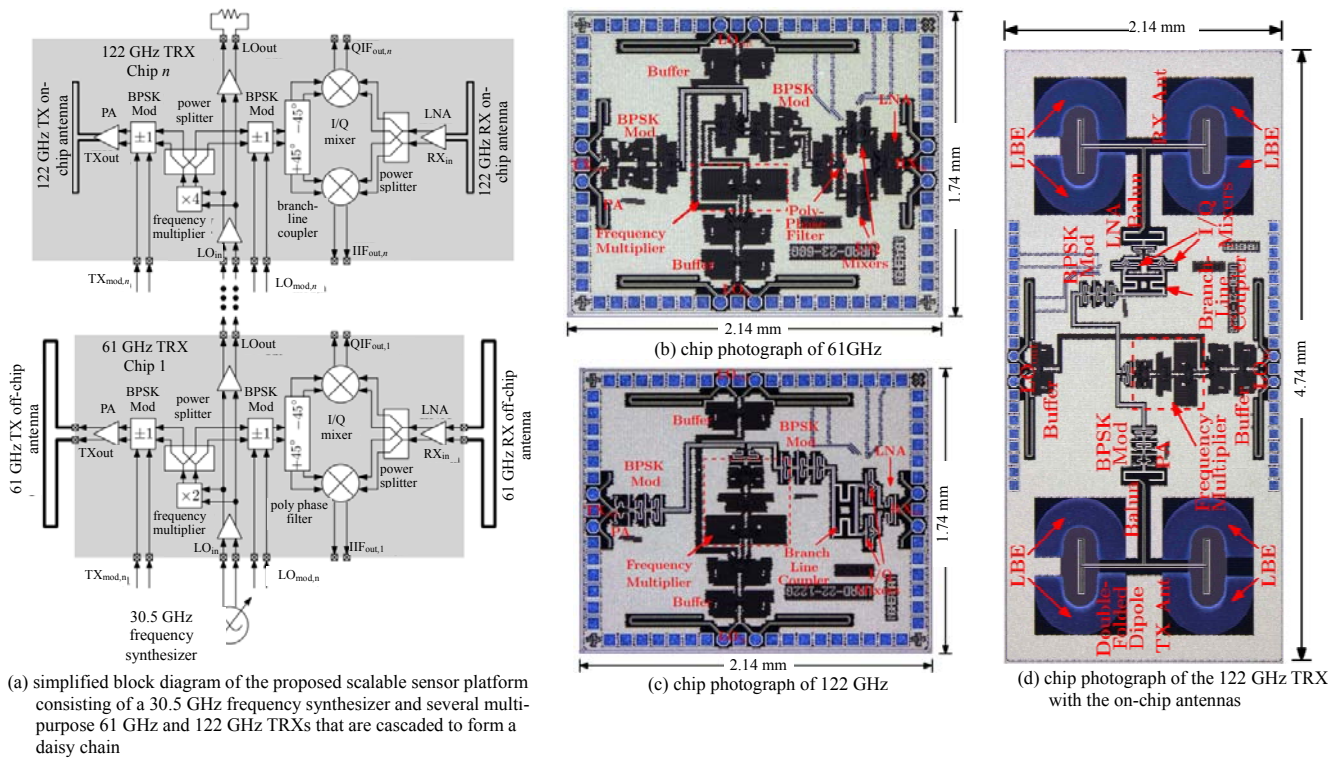


Fig.19 Multi-purpose radar
图 19 多用途雷达

高分辨力对于区分非常靠近的目标以及检测靠近雷达收发机的目标尤为重要，但高分辨力雷达需要宽的调制带宽，当雷达系统工作在较高的中心频率时更容易提供宽的带宽。2017 年，德国的 IHP 公司基于 130 nm SiGe BiCMOS 实现了一款多用途全差分的可扩展的雷达系统^[33]。该系统可以工作在 61 GHz 和 122 GHz，可适

用于对动态范围和分辨力有不同要求的应用。其中,图 19(a)给出了可扩展传感器平台的简化框图,包括一个 30.5 GHz 的频率合成器和几个多用途 61 GHz 和 122 GHz TRXs,它们级联拓展系统,版图如图 19(b)~(c)所示。61 GHz 的收发系统具有 11.5 dBm 的输出功率和 24 dB 的接收增益,更适合对动态范围要求高的一些应用。由于 61 GHz 和 122 GHz 的收发机都采用带宽为 2.5 GHz、工作频率为 30.5 GHz 的压控振荡器通过不同的变频为两个系统提供本振,根据倍频器的带宽拓展原理,122 GHz 的收发机扫描带宽为 10 GHz,可实现 3 cm 的距离分辨力,更适合对分辨力要求高的应用。由于 122 GHz 的波长短,在 122 GHz 的收发机集成片上天线,实现了高度的小型化,如图 19(d)所示。

2019 年,比利时的 IMEC 基于 28 nm bulk CMOS 实现了 145 GHz 的集成片上天线的 FMCW 雷达系统^[34]。该系统在发射端和接收端都通过两个级联的三倍频器将片外的 16.1 GHz 的信号转换到 145 GHz,最终获得 13 GHz 的射频带宽,可实现 11 mm 的距离分辨力,图 20(a)为整体电路框架。在设计中,为消除高频信号路径损耗,选择将 PLL 的中心 chirp 信号通过 PCB 分配到多个收发芯片,如图 20(b)所示。同时为了避免片上发射泄露对接收的影响,在接收端加入一个有源高通滤波器,对发射泄露产生的 DC 分量进行滤除。如果由于 PA 和 LNA 的群延迟将不需要的信号转移到接收的通带内,还可以通过延迟接收芯片对应的 16.1 GHz 的 chirp 信号进行克服。图 20(c)~(d)分别给出了单个芯片的显微镜照片和 3 个 TRX 芯片的 MIMO 组装板的放大视图。2021 年,该团队基于此款芯片组成阵列^[35],并结合生命体征探测和手势检测的应用,对其功能进行扩展。

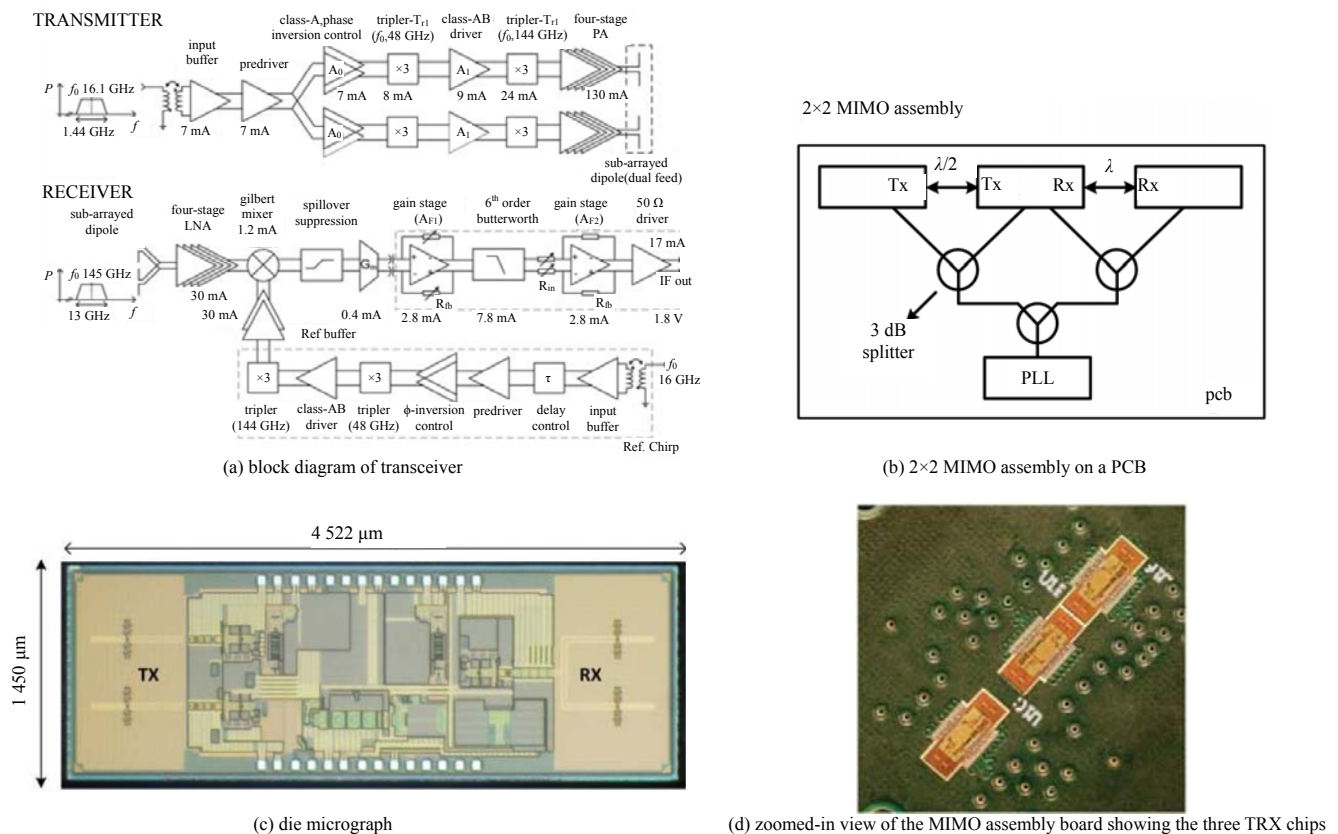


Fig.20 145 GHz FMCW radar
图 20 145 GHz FMCW 雷达

2020 年,麻省理工学院基于 65 nm CMOS 工艺实现了一款具有 100 GHz 带宽和 1.5 mm 距离分辨力的 220~320 GHz 太赫兹 FMCW 梳状雷达^[36-37],如图 21(a)所示。该雷达采用 5 个具有等间隔载波频率(即梳状)的收发机阵列同时扫描,每个收发机的带宽为 20 GHz,并具有单独的天线。在此架构中,外部的 FMCW 信号为 13.75~15 GHz,经过四倍频产生 55~60 GHz 的信号,再以转换步进为 5 GHz 进行上变频,最终实现等频率间隔的多个阵列。其中,为了保证相邻频道之间的频率连续性,外部的 FMCW 信号采用 25% 的 chirp 信号实现。与单收发机雷达架构相比,这种高度并行的方案可以实现显著的带宽扩展并在整个频带内具有更平坦的频率响应,且对工艺要求不高。对于太赫兹雷达未来更高的分辨力的需求,这种方案可行性更强,因而更具吸引力。图 21(b)和图 21(c)分别为整体版图和搭建的测试平台。为使太赫兹雷达系统的广泛运用成为现实,必须降低系

统的总成本，可通过多种方式实现：a) 提高集成度，尽可能减少外部组件；b) 减少价格昂贵的封装工艺和材料的使用，将低成本的传统制造技术用于高频系统；c) 将自测、故障检测、健康监测和自校准整合到射频集成电路中，减少毫米波验证的需要，显著降低测试的成本，并在发生故障时实现远程维护和系统重新配置；d) 采用可扩展的相控阵芯片，可以根据特定的链路预算构建更大的芯片阵列，大大增加系统设计的灵活性。2019 年，Nokia Bell Labs 采用 TowerJazz 0.18 μm SiGe BiCMOS 工艺实现了一款工作在 90.7 GHz 高度集成的可扩展的相控阵系统^[38]，该系统具有内置的自对准和自测试功能。每个单元芯片集成了 24 个移相器(16TX/8RX 或 8TX/16RX)以及上变频器、下变频器、成分频器的锁相环、模拟基带、波束查找存储器 and 用于性能监控的诊断电路，图 22(a)为单芯片相控阵的简化框图。由于芯片具有很好的扩展性，该团队将 16 个单元芯片组成到一个 PCB 上，实现了 384 个元件(256TX/128RX)的相控阵系统，如图 22(b)所示。其中，多个单元芯片可以通过类似于菊花形状的 LO 分布链路，使各个芯片之间实现信号同步和相对对齐，如图 22(c)所示。该阵列最大饱和的 EIRP 为 60 dBm(1 kW)，在超过 250 m 的等效链路距离下产生超过 10 Gb/s 的数据速率，如图 22(d)所示。该系统还可以将芯片内部或芯片之间的振幅变细，进一步改进波束模式。

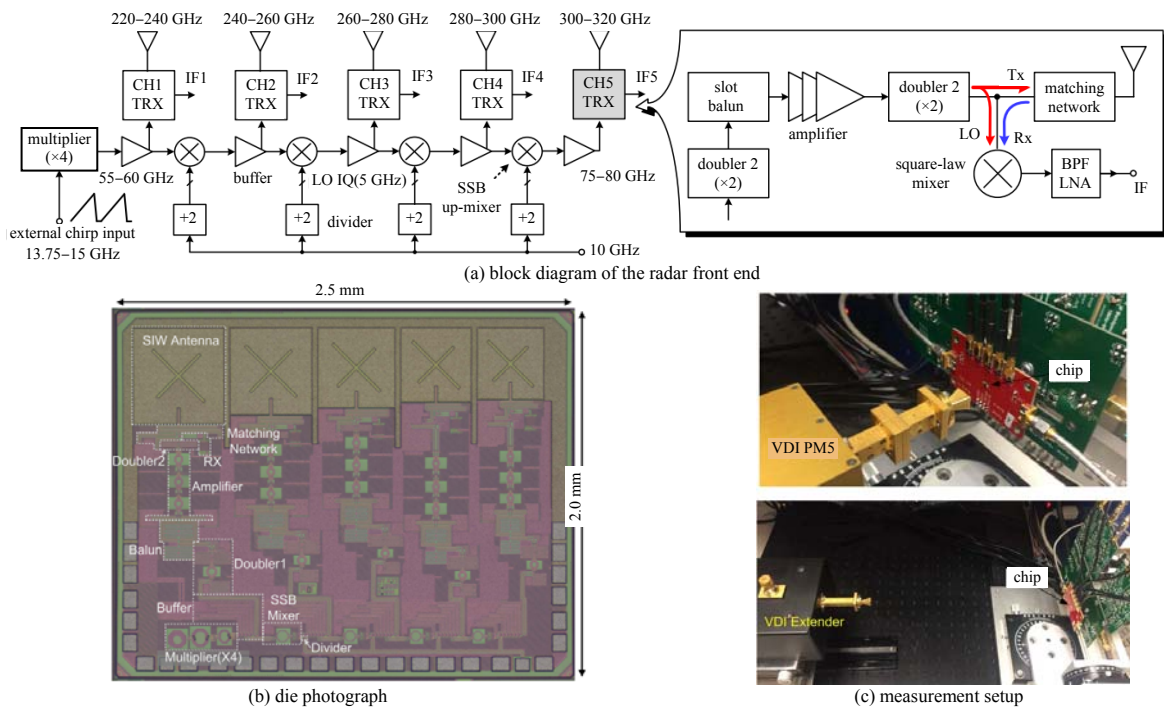
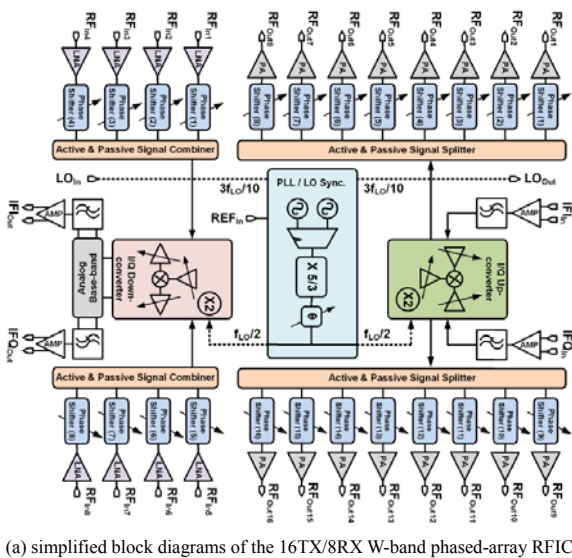
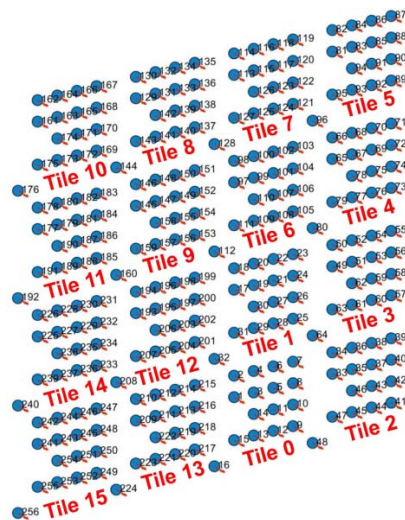


Fig.21 220–320 GHz FMCW comb radar
图 21 220~320 GHz FMCW 梳状雷达



(a) simplified block diagrams of the 16TX/8RX W-band phased-array RFIC



(b) simulation model for the presented large-scale phased array comprising 16 tiles

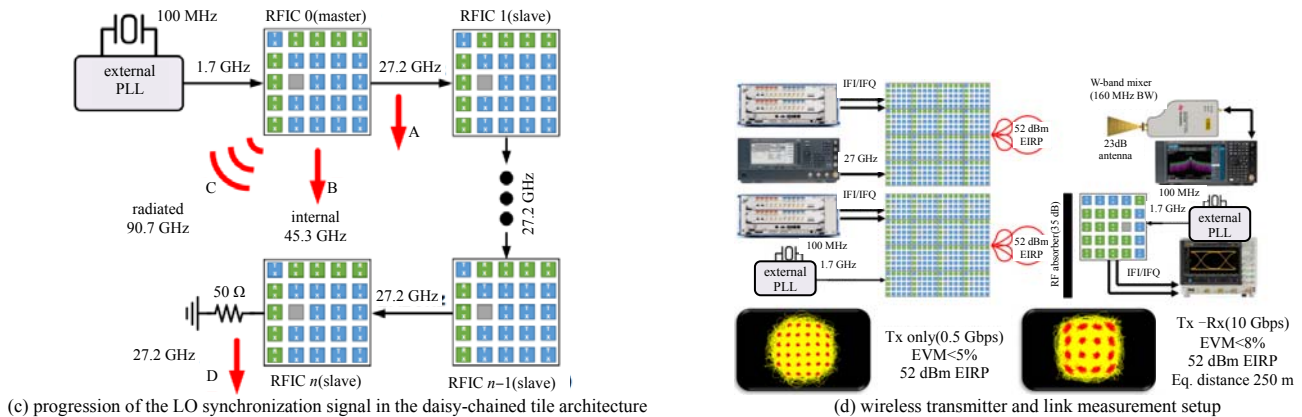


Fig.22 90.7 GHz fully integrated radar
图 22 90.7 GHz 高集成度雷达

国内的多机构在毫米波太赫兹雷达芯片设计方面做了很多的研究。2019 年，中国科学技术大学基于 65 nm CMOS 工艺实现了工作频率为 76~81 GHz 的三发四收的 FMCW 毫米波雷达芯片^[39]。2018 年，复旦大学基于 65 nm LP CMOS 工艺实现了具有 14 dBm 大输出功率的 FMCW 太赫兹发射机^[40]，其工作频率为 151~173 GHz。该芯片使用新型零相位耦合器，如图 23 所示，使 4 个注入锁定功率放大器同相输出，实现大的输出功率。这也大大提高了太赫兹雷达的探测距离。

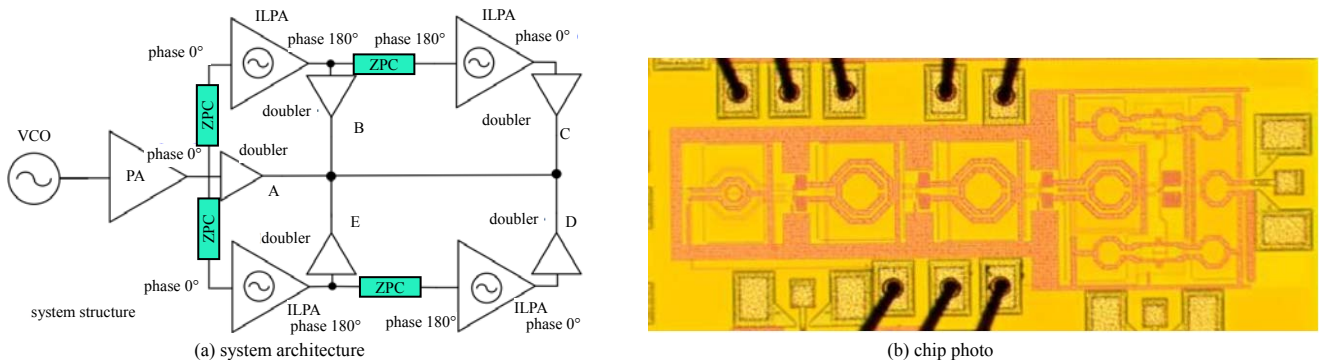


Fig.23 151-173 GHz FMCW transmitter
图 23 151~173 GHz FMCW 发射机

5 结论

在低成本和高集成度的市场化需求下，基于硅基的太赫兹系统在过去 10 年逐渐成为研究热点，并取得了飞速的进步。特别是在硅基太赫兹源、硅基太赫兹成像芯片、硅基太赫兹通信芯片、硅基太赫兹雷达芯片这四个方面，产生了大量的研究并推动硅基太赫兹系统的发展。随着工艺的持续进步，太赫兹集成电路逐渐向高集成度、高精度度、大阵列等方向发展，但同时也面临着如下挑战：

1) 在不断的工作频率条件下，有源器件模型的有效性和无源器件的损耗逐渐制约了硅基工艺太赫兹电路的快速发展。同时，硅基工艺多层金属和多层介质的特点使得各个器件在太赫兹频段产生非常复杂的寄生、耦合效应，大大增加了太赫兹电路的设计难度。

2) 太赫兹频段波长短，有利于系统的集成。但太赫兹电路容易产生分布效应，也更容易受到表面粗糙度的影响，因此需要根据创新封装和互联技术实现系统的集成。

3) 为了实现较高的角度分辨力，当从单个通道到阵列芯片的扩展时，需要保证多通道的协同工作，因此对源同步的技术提出了更高的要求。在太赫兹雷达和通信应用中，为了保证探测和信号传递的准确性，需要更复杂的校准系统来协同工作。

4) 受性能等方面的影响，硅基太赫兹的通信应用场景还不是十分明确。目前，硅基太赫兹的关键应用主要还是在成像和雷达传感器方面，有待于提高性能从而进一步拓宽应用领域。

参考文献：

- [1] NICHOLS E F, TEAR J D. Joining the infrared and electric wave spectra[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1923,9(6):211–214.
- [2] 王宏强,邓彬,秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. 雷达学报, 2018,7(1):1–21. (WANG Hongqiang,DENG Bin,QIN Yuliang. Terahertz radar technology[J]. Journal of Radars, 2018,7(1):1–21.)
- [3] 孙玲玲,文进才,刘军,等. 硅基太赫兹集成电路研究进展[J]. 微波学报, 2013,29(5–6):43–48. (SUN Lingling,WEN Jincai, LIU Jun,et al. Research advances in silicon based terahertz integrated circuits[J]. Journal of Microwaves, 2013,29(5–6):43–48.)
- [4] HILLGER P,GRZYB J,JAIN R,et al. Terahertz imaging and sensing applications with silicon-based technologies[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019,9(1):1–19.
- [5] RODRIGUEZ-VAZQUEZ P,GRZYB J,SARMAH N,et al. A 65 Gbps QPSK one meter wireless link operating at a 225–255 GHz tunable carrier in a SiGe HBT technology[C]// 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium(RWS). Anaheim,CA, USA:IEEE, 2018:146–149.
- [6] HU Z,KAYNAK M,HAN R. High power radiation at 1 THz in silicon:a fully scalable array using a multi-functional radiating mesh structure[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018,53(5):1313–1327.
- [7] AHMAD Z,LEE M,KENNETH K O. 20.5 1.4 THz,13 dBm-EIRP frequency multiplier chain using symmetric-and asymmetric-CV varactors in 65 nm CMOS[C]// 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). San Francisco,CA, USA:IEEE, 2016:350–351.
- [8] 汪柏康,白雪,徐雷钧. 基于 CMOS 工艺的太赫兹振荡器研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(3):364–368. (WANG Bokang,BAI Xue,XU Leijun. Research on terahertz meter based on CMOS process[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(3):364–368.)
- [9] JOHNSON E O. Physical limitations on frequency and power parameters of transistors[C]// IRE International Convention Record. New York,NY,USA:IEEE, 1965.
- [10] ÖJEFORS E,GRZYB J,ZHAO Y,et al. A 820 GHz SiGe chipset for terahertz active imaging applications[C]// 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco,CA,USA:IEEE, 2011:224–226.
- [11] GUO K,ZHANG Y,REYNAERT P. A 0.53 THz subharmonic injection-locked phased array with 63 μ W radiated power in 40 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018,54(2):380–391.
- [12] GUIMARAES G,REYNAERT P. 29.6 A 660-to-676 GHz 4×2 oscillator-radiator array with intrinsic frequency-filtering feedback for harmonic power boost achieving 7.4 dBm EIRP in 40 nm CMOS[C]// 2020 IEEE International Sol-State Circuits Conference(ISSCC). [s.n.]:IEEE, 2020:450–452.
- [13] JAIN R,HILLGER P,J GRZYB,et al. 29.1 A 0.42 THz 9.2 dBm 64 pixel source-array SoC with spatial modulation diversity for computational terahertz imaging[C]// 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). [s.n.]: IEEE, 2020:440–442.
- [14] JALILI H,MOMENI O. A 0.46 THz 25 element scalable and wideband radiator array with optimized lens integration in 65 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020,55(9):2387–2400.
- [15] HAN R,ZHANG Y,COQUILLAT D,et al. 280 GHz Schottky diode detector in 130 nm digital CMOS[C]// Custom Integrated Circuits Conference. San Jose,CA,USA:IEEE, 2010:1–4.
- [16] HAN R,ZHANG Y,COQUILLAT D,et al. A 280 GHz Schottky diode detector in 130 nm digital CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011,46(11):2602–2612.
- [17] AL-HADI R,SHERRY H,GRZYB J,et al. A 1 k-pixel video camera for 0.7–1.1 Terahertz imaging applications in 65 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012,47(12):2999–3012.
- [18] HAN R,JIANG C,MOSTAJERAN A,et al. A SiGe terahertz heterodyne imaging transmitter with 3.3 mW radiated power and fully-integrated Phase-Locked Loop[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(2):2935–2947.
- [19] JIANG C,MOSTAJERAN A,HAN R,et al. 25.5 A 320 GHz subharmonic-mixing coherent imager in 0.13 m SiGe BiCMOS[C]// 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). San Francisco,CA,USA:IEEE, 2016:432–434.
- [20] HAN R,JIANG C,MOSTAJERAN A,et al. 25.5 A 320 GHz phase-locked transmitter with 3.3 mW radiated power and 22.5 dBm EIRP for heterodyne THz imaging systems[C]// 2015 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, CA,USA:IEEE, 2016:1–3.
- [21] HU Z,WANG C,HAN R. A 32 unit 240 GHz heterodyne receiver array in 65 nm CMOS with array-wide phase locking[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019,54(5):1216–1227.
- [22] MOSTAJERAN A,NAGHAVI S M,EMADI M,et al. A high-resolution 220 GHz ultra-wideband fully integrated ISAR imaging

- system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,67(1):429–442.
- [23] GRZYB J, HEINEMANN B, PFEIFFER U R. A 0.55 THz near-field sensor with a μm -range lateral resolution fully integrated in 130 nm SiGe BiCMOS[J]. IEEE Journal of Solid State-Circuits, 2016,51(12):3063–3077.
- [24] HILLGER P, JAIN R, GRZYB J, et al. A 128 pixel system-on-a-chip for real-time super-resolution terahertz near-field imaging[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018,53(12):3599–3612.
- [25] LIU Z Y, LIU L Y, YANG J, et al. A fully-integrated 860 GHz CMOS terahertz sensor[C]// 2015 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference. Xiamen, China: IEEE, 2016:1–4.
- [26] FANG T, LIU Z Y, LIU L Y, et al. Detection of 3.0 THz wave with a detector in 65 nm standard CMOS process[C]// 2017 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference(A-SSCC). Seoul, Korea(South): IEEE, 2017:189–192.
- [27] SARMAH N, GRZYB J, STATNIKOV K, et al. A fully integrated 240 GHz direct-conversion quadrature transmitter and receiver chipset in SiGe technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2016,64(2):562–574.
- [28] HUSSEIN E M, ANDREA M, 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.
- [29] LEE S, R DONG, YOSHIDA T, et al. 9.5 an 80 Gb/s 300 GHz-band single-chip CMOS transceiver[C]// 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2019:170–172.
- [30] ABDO I, FUJIMURA T, MIURA T, et al. A 300 GHz wireless transceiver in 65 nm CMOS for IEEE802.15.3d using push-push subharmonic mixer[C]// 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Denver, CO, USA: IEEE, 2020:623–626.
- [31] CHEN Z, DENG W, JIA H, et al. A 122–168 GHz radar/communication fusion-mode transceiver with 30 GHz chirp bandwidth, 13 dBm psat, and 8.3 dBm OP1dB in 28 nm CMOS[C]// 2021 Symposium on VLSI Circuits. [s.n.]: IEEE, 2021:1–2.
- [32] TOWNLEY A, SWIRHUN P, TITZ D, et al. A 94 GHz 4TX–4RX phased-array FMCW radar transceiver with antenna-in-package[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017,52(5):1245–1259.
- [33] NG H J, KUCHARSKI M, AHMAD W, et al. Multi-purpose fully differential 61 and 122 GHz radar transceivers for scalable MIMO sensor platforms[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017,52(9):2242–2255.
- [34] VISWESWARAN A, VAESSEN K, SINHA S, et al. 9.4 A 145 GHz FMCW-radar transceiver in 28 nm CMOS[C]// 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2019:168–170.
- [35] VISWESWARAN A, VAESSEN K, GLASSE M, et al. A 28 nm CMOS based 145 GHz FMCW radar: system, circuits, and characterization[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2021,56(7):1975–1993.
- [36] YI X, WANG C, LU M, et al. 4.8 A terahertz FMCW comb radar in 65nm CMOS with 100GHz bandwidth[C]// 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2020:90–92.
- [37] YI X, WANG C, CHEN X, et al. A 220-to-320 GHz FMCW radar in 65 nm CMOS using a frequency-comb architecture[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020,56(2):327–339.
- [38] SHAHRAMIAN S, HOLYOAK M J, SINGH A, et al. A fully integrated 384-element, 16-tile, W-band phased array with self-alignment and self-test[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019,54(9):2419–2434.
- [39] DUAN Z, PAN D, WU B, et al. A 76–81GHz FMCW transceiver with 3-transmit, 4-receive paths and 15 dBm output power for automotive radars[C]// 2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC). [s.n.]: IEEE, 2019:39–42.
- [40] MA S, WU T, ZHANG J, et al. A 151-to-173 GHz FMCW transmitter achieving 14 dBm psat with synchronized injection-locked power amplifiers and five in-phase power combining doublers in 65 nm CMOS[C]// 2018 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC). Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2018:268–271.

作者简介:

张蕾(1991–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为射频毫米波集成电路设计. email: zhanglei_yq@163.com.

孟凡易(1987–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为基于 CMOS 工艺的 mm-Wave/THz 集成电路与系统和异质集成电路与系统、mm-Wave/THz 相控阵系统、高能电力电子等。

傅海鹏(1985–), 男, 副教授, 主要研究方向为射频、毫米波集成电路设计、太赫兹探测器、晶体管可靠性建模。

王科平(1981–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带射频与毫米波集成电路、射频集成电路与微纳传感器协同设计、应用于物联网和生物医疗系统的超低功耗无线集成电路等。

马凯学(1973–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为射频、毫米波集成电路设计等。