

硅基太赫兹频率源关键技术研究进展综述*

冯林平^{1,2}, 易翔^{1,2}, 朱浩慎^{1,2}, 廖绍伟^{1,2}, 车文荃^{1,2}, 薛泉^{✉1,2}

(1 华南理工大学 广州 510641

2 广东省毫米波与太赫兹技术重点实验室 广州 510641)

摘要: 随着太赫兹技术的发展, 由于太赫兹 THz (Terahertz) 频段具有丰富的频谱资源和相对宽的带宽优势, 因此太赫兹频率源表现出广泛的应用前景, 如超高速短距无线/有线通信、雷达、医疗、成像和遥感传感器等。本文总结了硅基太赫兹频率源的最新研究成果和存在的问题, 概述了近二十年来太赫兹倍频器、太赫兹振荡器、太赫兹天线、太赫兹辐射源、太赫兹辐射源阵列等方面的研究进展, 并对硅基太赫兹频率源的发展方向和未来热点进行了展望。

关键词: 太赫兹; 太赫兹频率源; 太赫兹天线; 硅基工艺

中图分类号: TN604 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)02-0111-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210914001

引用格式: 冯林平, 易翔, 朱浩慎, 等. 硅基太赫兹频率源关键技术研究进展综述[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 111-119.

Review of research progress on key technologies of silicon-based terahertz frequency sources

FENG Linping^{1,2}, YI Xiang^{1,2}, ZHU Haoshen^{1,2}, LIAO Shaowei^{1,2}, CHE Wenquan^{1,2}, XUE quan^{1,2}

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Millimeter-Wave and Terahertz, Guangzhou 510641, China)

Abstract: With the development of terahertz (THz) technology, the advantages of the abundant spectrum resources and relatively wide bandwidth for the terahertz frequency band make THz frequency sources show a wide range of applications such as ultra-high-speed short-range wireless/wired communications, radar, medical, imaging, and remote sensing sensors. This paper summarizes the latest research results and problems encountered in silicon-based THz frequency sources, such as THz frequency multipliers, THz oscillators, THz antennas, THz radiator, and THz radiation arrays in the past two decades. At last, the development direction and future hot spots of silicon-based THz frequency sources are prospected.

Key words: Terahertz (THz); Terahertz source; Terahertz antenna; Silicon-based process

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210914001

Citation: FENG Linping, YI Xiang, ZHU Haoshen, et al. Review of research progress on key technologies of silicon-based terahertz frequency sources[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 111-119.

引 言

太赫兹波是频率范围为 0.1 THz~10 THz、波长范围 (0.03 mm~3 mm) 介于无线电波和光波之间的电磁辐射。这个频段是人类迄今为止了解最少、开发最不充分的电磁波资源。它是覆盖很广泛并且很特殊的一个频谱区域, 其低频段与电子学领域的毫米波频段相互重叠, 而高频段与光学领域的红外频段重叠。太赫兹频率范围处于电子学和光子学的交叉区域, 具有携带信息丰富、亚皮秒量级脉宽、高时空相干性、低光子能量、穿透性强、使用安全性高、定向性好、带宽高等特性, 因此太赫兹技术在国土安全、天文、医疗、生物、计算机、通信、科学研究等领域有独特的学术价值和广阔的应用前景, 被誉为未来

*基金项目: 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目 (毫米波与太赫兹技术 2017ZT07X032)

✉通信作者: 薛泉 (eeqxue@scut.edu.cn)

收稿日期: 2021-09-14 收修改稿日期: 2021-10-13

改变世界的十大技术之一。太赫兹科学技术已经成为国际上优先发展的学科领域和各国争相抢占的科技制高点,是当前最受关注的国际学术前沿领域之一,它的发展对提高国家科技实力、促进国民经济发展、维护国土安全和社会安定都具有前瞻性、战略性和全局性的重大意义。

太赫兹频率源是研究太赫兹频谱特性及其应用的基础,是太赫兹系统最基本的核心元件,对太赫兹的应用发展起着决定性作用。尽管太赫兹技术具有广阔的应用前景,但太赫兹频段仍是电磁频谱中开发和应用较少的频段。其中,缺乏稳定可靠的太赫兹频率源是太赫兹技术发展面临的巨大瓶颈之一。因此,太赫兹频率源的研究和应用成为十分紧迫的需求。图 1 所示为瓦片式太赫兹相控阵,信号经过移相器、倍频器以及天线进行收发。

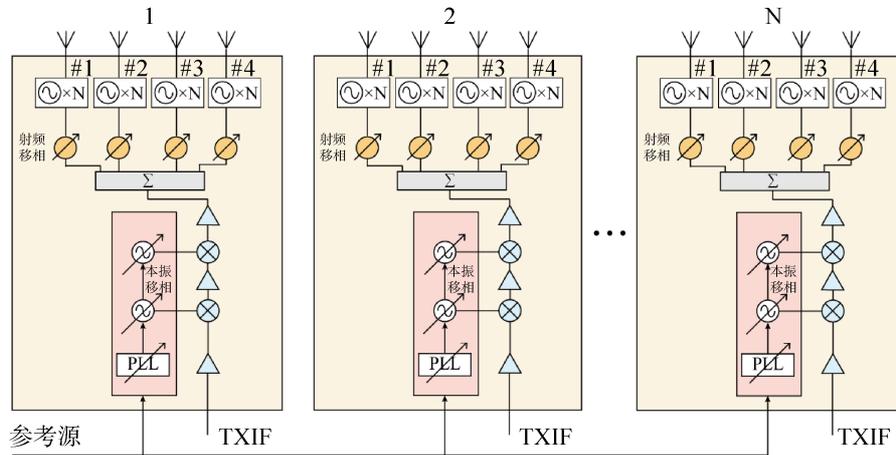


图 1 瓦片式太赫兹相控阵架构

Fig. 1 Terahertz phased array architecture

目前,商用的太赫兹频率源前端电路主要采用较昂贵的 III-V 族半导体技术,如砷化镓 (GaAs) 和磷化铟 (InP) 技术,这些技术的高成本严重制约了太赫兹技术的发展和應用。近年来,随着硅基半导体工艺的不断进步,场效应管的沟道长度不断减小,CMOS 和 SiGe BiCMOS 器件的截止频率/最大振荡频率 (f_t/f_{max}) 分别达到了 300 GHz/450 GHz^[1]和 505 GHz/720 GHz^[2],因此硅基工艺上实现太赫兹频率源已经成为可能。相比传统的 III-V 族半导体工艺,硅基工艺具有价格低廉、易于与数字电路集成、可靠性高等优势,具备把太赫兹集成产品推广到广大的消费类电子市场的潜力。正是由于其存在着的巨大应用需求和商业前景,当前学术界和工业界都掀起了硅基太赫兹集成电路研究的热潮^[3,4]。

近年来,国内外均开展了太赫兹频率源的关键电路的研究,虽然已取得了一些成果,但仍有大量的工作需要开展。特别是国内在这一领域起步较晚,开展的研究工作尚不够深入,并且研究进展受限于半导体等工艺技术。近几年来,人们对太赫兹频率源中的关键电路,如倍频器、振荡器、天线、太赫兹辐射源和辐射源阵列等开展了较为深入的研究,下面将对国内外的研究现状进行回顾与总结。

1 太赫兹倍频器

较早应用于太赫兹频段的倍频器研究主要以 III-V 族半导体为主。由于 III-V 族基板具有高的绝缘性,因此以 III-V 族材料为基板的高电子迁移率晶体管 HEMT (High-Electron-Mobility Transistor) 及异质结双极晶体管 HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) 可实现较低的插入损耗,且 III-V 族工艺下制作的无源器件具有较好的品质因数。近年来,随着硅基工艺的截止频率越来越高,采用硅基实现太赫兹倍频器的研究越来越多。由于倍频方法产生的太赫兹信号具有稳定性好、主振荡频率较低、工作频段较宽、调制度较深等优点,因此常常被优先采用。国外对太赫兹倍频器电路的研究较早,在工业界以及学术界,众多学者以及工程师们对各种新原理、新方法、新结构、新工艺进行了深入研究,并将其应用到各种类型的太赫兹频率源系统中,取得了不少令人瞩目的成果。2011 年,德国的 OJEFORS E 采用 0.13 μm

SiGe HBT工艺基于多倍频器链路级联方式实现325 GHz太赫兹源,输出功率-3 dBm,直流功耗420 mW,3 dB带宽范围为308 GHz~328 GHz^[5]。为了提升功率效率和带宽,2013年,美国的HAN R N等人,采用CMOS工艺的变容二极管实现了480 GHz的太赫兹频段的二倍频器,该电路拓扑结构简单,使基波信号在输出端口等幅反向抵消,输出二次谐波信号,其显著的特点是直流功耗很低^[6],如图2所示。2018年,德国NIKPAIK A等人采用65 nm CMOS工艺设计了D波段(129 GHz~171 GHz)的四倍频器,实现了42 GHz的3-dB带宽,是目前已经报道的最宽带宽,且具有1.7%的转换效率、2.1 dBm的饱和输出功率、5 dB的最大转换增益^[7]。

2011年,中国工程物理研究院的王磊和熊永忠等人利用0.13 μm SiGe HBT技术研制成功一个单片D波段(120 GHz~140 GHz)二倍频器。测试结果表明,输入功率约-1 dBm时,输出频率为134 GHz处获得的最小变频损耗约为3.2 dB,效率约为5.8%,输入功率约为3.1 dBm;在输出频率为132 GHz处获得最大输出功率-1.4 dBm,效率约为7%^[8]。2014年,中国科学院上海微系统与信息技术研究所孙晓玮研究员课题组采用0.1 μm GaAs pHEMT工艺设计了W波段(85 GHz~110 GHz)的二倍频器。在100 GHz的工作频率处其输出功率和效率性能优良,最大效率为11.2%,饱和输出功率9 dBm;在85 GHz~110 GHz频率范围基频信号抑制在-30 dB以下^[9]。2016年,清华大学王志华教授课题组采用65 nm CMOS工艺设计了注入锁定的二倍频器。在3.4 dBm~4.1 dBm注入功率下,其锁定的频率范围为69.2 GHz~94.6 GHz^[10]。由于国内的工艺、加工精度、器件等与国外相比具有一定的差距,导致国内的太赫兹倍频器在带宽、倍频损耗、集成度等方面各项指标都没有达到国际先进水平。虽然研究人员提出了一些太赫兹倍频器设计方法,但依然存在许多问题函待解决。鉴于这种局面,我国需要加大对太赫兹倍频器的研究力度。部分太赫兹倍频器参数对比见表1。

表1 部分太赫兹倍频器对比

Table 1 Parameters of Terahertz frequency doubler

文献编号	工作频带 (GHz)	效率 (%)	功率 (mw)	工艺	功耗 (mw)
[5]	308~328	/	-3 dBm	SiGe HBT	420
[6]	480	/	0.23	CMOS	0
[7]	129~171	1.7	2.1	CMOS	\
[9]	85~110	11.2	9	GaAs	\

2 太赫兹振荡器

与太赫兹倍频器相比,太赫兹振荡器具有面积小、能量转换效率高和不需要输入驱动的优点,但其不足之处是调谐范围较窄、频率稳定性差。随着硅工艺的迅速发展,在硅工艺如CMOS和SiGe BiCMOS工艺上实现太赫兹振荡器已经成为可能。由于硅基工艺的性能劣势,硅基太赫兹振荡器电路的研究开展得相对较晚,研究难度较大,目前的研究进展离III-V族半导体还有一定的差距。但是,硅基半导体的研究已经逐渐成为热点,每年召开的集成电路设计领域最著名的学术会议(ISSCC、VLSI、CICC、ESSCIRC、RFIC以及A-SSCC等)中,关于硅基太赫兹电路的论文在逐渐增多,电路的性能也在逐渐提高。虽然随着半导体器件的体积在不断缩小,但是CMOS器件最大振荡频率的提升仍然有限。因此为了实现更高的振荡频率,大部分CMOS太赫兹信号源采用谐波振荡器。2008年,美国佛罗里达大学

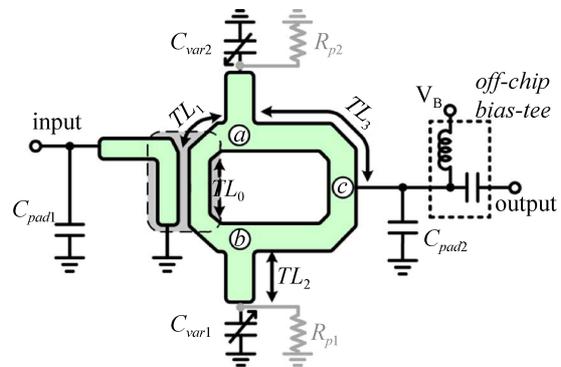


图2 基于变容二极管的太赫兹倍频器^[6]
Fig. 2 Terahertz frequency doubler based on varactor diode

SEOK E 等人采用 45 nm CMOS 工艺、交叉耦合结构实现了一款工作频率为 410 GHz 的推推式 (push-push) 压控振荡器。在 1.5 V 电源电压下, 其功耗为 16.5 mW, 通过天线对信号进行输出, 辐射功率为 -47 dBm, 调谐范围为 0~2 GHz。虽然这款振荡器与之后实现的 CMOS 太赫兹信号源相比性能一般, 但它在当时已为 CMOS 太赫兹信号源的发展奠定了重要基础^[11]。2014 年, 台湾国立中央大学 Li C H 等人采用 40 nm CMOS 工艺实现了一款工作频率在 340.6 GHz 的三推式 (triple-push) 振荡器, 在 0.9 V 电源电压下, 其功耗为 34.1 mW, 输出功率为 -11.1 dBm, 不具备调谐功能; 该振荡器电源电压升至 1.3 V 时, 其振荡频率为 340.1 GHz, 功耗为 78.3 mW, 输出功率为 -9.1 dBm。该电路采用三推式 (triple-push) 振荡器结构实现了差分输出^[12]。2018 年, 奥地利 AHMED F 等人采用 SiGe HBT BiCMOS 设计了 300 GHz 太赫兹推推式 (push-push) 振荡器, 其最大的输出功率为 0.2 dBm, 噪声系数为 -105 dBc/Hz, 频率调节范围为 0.9%。该振荡器有比较好的输出功率、频率调节范围以及能换效率。其中一块振荡器在 1V 的供电下, 实现了 67.8 GHz~81.4 GHz 的频率调节范围, 对应 -108-113 dBc/Hz @10-MHz 噪声范围, 以及 13-dBm 的直流功耗^[13]。

2017 年, 清华大学王志华教授课题组设计了接近半导体器件最大振荡频率的振荡器, 工作在 192.3 GHz, 在 1.2 V 供电下最大输出功率 -10.4 dBm, 噪声 -100 dBc/Hz @ 10 MHz^[14]。2018 年, 东南大学洪伟教授课题组采用 0.13 μm SiGe BiCMOS 工艺研制出 243 GHz 振荡器, 在 0.94 V 供电下, 其最大输出功率为 -1.4 dBm, 频率调谐范围为 5.18%, 能换效率 1.95%^[15]。同年, 华南理工大学薛泉教授课题组提出了无变容管的振荡器技术, 如图 3 所示, 实现了振荡器的频率调节和相位噪声的最优化设计^[16]。部分太赫兹振荡器对比见表 2。

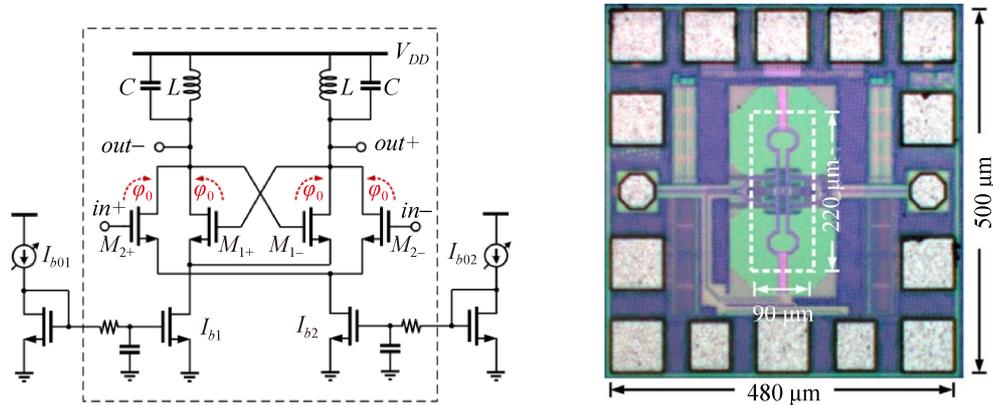


图 3 无变容二极管太赫兹振荡器

Fig. 3 THz oscillator without varactor diode

表 2 部分太赫兹振荡器对比

Table 2 Parameters of Terahertz frequency multiplier

文献编号	工作频带 (GHz)	调谐范围 (GHz)	噪声系数	工艺	功耗 (mw)
[11]	410	2	/	CMOS	16.5
[12]	340.6	0	/	CMOS	78.3
[13]	300	3.06	-105 dBc/Hz	SiGe HBT	25
[15]	243	1.25	/	SiGe BiCMOS	/

3 太赫兹天线

太赫兹天线是太赫兹辐射源的重要组成部分。近几年以来, 随着太赫兹技术的发展, 国内外关于太赫兹天线的报道也非常多。之前已有的硅基太赫兹阵列的文献报道中均采用了传统的电波天线结构来实现太赫兹波的接收。德国乌珀塔尔大学 Pfeiffer 教授团队于 2008 年利用 0.25 μm 工艺在 600 GHz 实现

90 μm 的偶极子天线，天线单元增益为 5 dBi^[17]，随后使用半波长差分贴片天线构成 650 GHz 焦平面阵列，天线单元增益为 2.1 dBi，带宽为 7%^[18]。美国 REBEIZ G 教授团队于 2013 年利用 BiCMOS 工艺实现 360 GHz 椭圆槽环天线，单元天线增益为 4.5 dBi，辐射效率为 62%^[19]。2016 年，以色列 SOCHER E 教授利用 65 nm CMOS 工艺在 296 GHz 使用环形天线实现 2×3 阵列^[20]。2018 年，美国 JALILI H 等人采用 0.13 μm SiGe BiCMOS 设计了基于偶次谐波直接耦合馈电的 2×2 的 340 GHz 片上贴片天线，有效地避免了馈电网络的损耗和寄生效应^[21]。

2015 年，南京理工大学吴文教授团队采用 0.13 μm SiGe BiCMOS 设计了 340 GHz 高增益高效率太赫兹三维天线结构^[22]，该天线加载了基片集成波导作为背腔，因此天线的副瓣比较低。2017 年，华南理工大学薛泉教授课题组提出分布式封装天线的全新设计概念，如图 4 所示，该设计充分利用芯片和封装的结构优势，采用空间电磁波耦合互连，克服传统片上天线在太赫兹频段介质、金属损耗大，以及天线与激励源互连损耗大的缺点^[23]。2018 年，东南大学洪伟教授课题组提出了片上的介质谐振器天线^[24]。部分太赫兹天线参数对比见表 3。

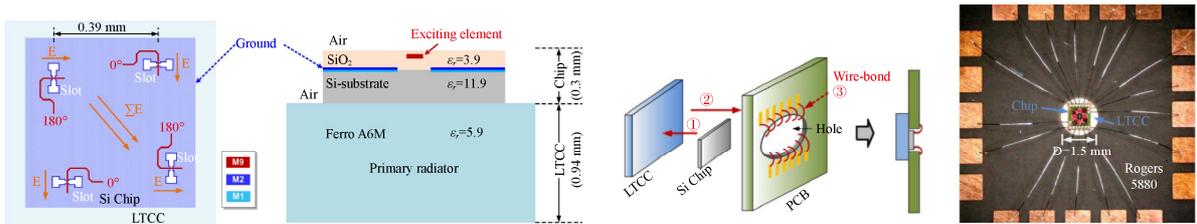


图 4 太赫兹分布式封装天线

Fig. 4 THz distribute antenna

表 3 部分太赫兹天线对比

Table 3 Parameters of Terahertz antenna

文献编号	工作频带 (GHz)	带宽 (GHz)	增益 (dBi)	工艺	天线类型
[17]	650	4.55	2.1	CMOS	偶极子
[18]	360	\	4.5	BiCMOS	槽环天线
[22]	340	40.8	10	SiGe BiCMOS	SIW
[23]	312	45	11.9	LTCC	槽天线+透镜

4 太赫兹辐射源

通常太赫兹辐射源是太赫兹系统的核心模块。产生太赫兹辐射源的方式主要是太赫兹多倍频器链或谐波振荡器的信号通过天线辐射出去。早期大多数太赫兹辐射源的研究大多数基于 III-V 族半导体工艺，具有性能高、价格昂贵、集成度和良率低的特点。相较而言，硅基工艺具有低成本、高集成度和小型化等优势，目前国际上采用硅基工艺实现太赫兹辐射源已取得诸多进展。2008 年，美国的 SEOKL E 等报道了采用 45 nm CMOS 工艺的 410 GHz 太赫辐射源，该辐射源中使用了推推振荡器 (push-push oscillator)，馈入一对差分信号抵消振荡器基波成分使其工作在二倍频，从而在一定程度上克服半导体器件最大振荡频率的限制^[25]。2012 年，美国加州理工学院 HAJIMIRI A 教授课题组提出一种波束可控太赫兹辐射源，该辐射源工作在 280 GHz，采用 45 nm SOI CMOS 工艺，集成分布式有源天线、压控振荡器、注入锁定三倍频器等关键器件，通过精确控制相位实现了 80°方位角和俯仰角的二维波束扫描^[26]。其集成有源分布式天线是该项目的一大特色，能够有比较高的辐射效率。2015 年，美国康奈尔大学 AFSHARI E 报道了一种 340 GHz 基于 65 nm CMOS 工艺的太赫兹辐射源，通过控制相邻单元的耦合实现了频率锁定调谐和波束的独立控制^[27]。2019 年，比利时鲁汶大学 REYNAERT P 设计了基于 40 nm CMOS 工艺 530 GHz 的太赫兹辐射源，该辐射源通过两次注入锁定技术补偿相位误差以及幅度波动，从而实现相位的精准控制 E 面的波束扫描；该辐射源的辐射功率为 -12 dBm，转换效率为 0.24%^[28]。

由于国内太赫兹辐射源方面研究起步相对较晚, 并受限于半导体工艺以及加工技术等, 技术水平与国外相比还有一定差距, 但是在该领域也开展了一些研究工作, 并取得了较大的成果。2015 年, 中国工程物理研究院的熊永忠教授报道了基于 $0.13 \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 工艺相控发射机架构的太赫兹辐射源, 实现了最大 EIRP 10.6 dBm 以及 $\pm 12^\circ$ 波束扫描范围^[29]。2017 年, 华南理工大学薛泉教授课题组提出基于分布式封装天线的硅基 65 nm CMOS 工艺的 312 GHz 太赫兹辐射源, 该团队提出的辐射激励芯片+封装分布式天线的全新设计理论极大地提高了芯片与天线互联的自由度, 降低了太赫兹频段严重的互连损耗和辐射损耗, 有效地提高了辐射增益^[30], 如图 5 所示。2018 年, 东南大学毫米波国家重点实验室洪伟教授课题组使用 $0.1 \mu\text{m}$ GaAs 工艺, 使用 9 次倍频和片上介质谐振天线的 270 GHz 太赫兹辐射源, 实现了 4 dBm 的输出功率^[31]。部分太赫兹辐射源参数对比见表 4。

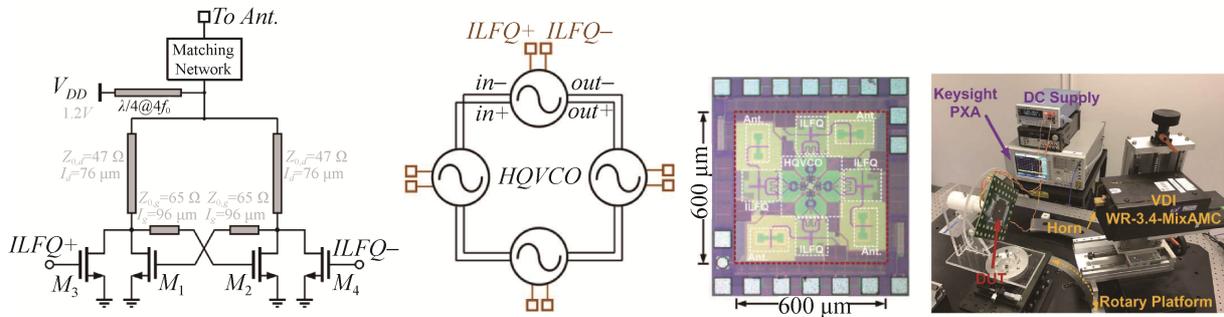


图 5 太赫兹分布式辐射源

Fig. 5 THz distribute radiation source

表 4 部分太赫兹辐射源对比

Table 4 Parameters of THz radiation sources

文献编号	工作频段 (GHz)	功率 (dBm)	效率 (%)	工艺	波束控制
[28]	530	-12 dBm	0.24	CMOS	E 面
[29]	324	-6.5	/	SiGe BiCMOS	$\pm 12^\circ$
[30]	312	4.42	0.42	CMOS/LTCC	/
[31]	270	4	/	GaAs/介质	/

5 太赫兹辐射源阵列

由于目前器件在太赫兹频率下输出功率仍较低, 为了增大总体辐射功率, 太赫兹辐射源阵列应运而生。国外对基于阵列天线的太赫兹辐射源关键器件和电路的研究较早, 在工业界以及学术界, 众多学者以及工程师们对各种新原理、新方法、新结构进行了深入研究, 并将其应用到各种类型的电路中, 取得了不少令人瞩目的成果。2011 年, 德国 ÖJEFORS E 等人采用 $0.25 \mu\text{m}$ SiGe CMOS 工艺提出基于多倍频链路的 820 GHz 太赫兹辐射源, 在 823 GHz 最大的 EIRP 功率为 -17 dBm , 但是该辐射源阵列的带宽较小, 架构比较复杂^[32]。2014 年, 德国的 PFEIFFER U 等人提出了基于 $0.13 \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 的谐波振荡器级联的 4×4 的可重构辐射源阵列, 频率调谐范围为 $519 \text{ GHz} \sim 536 \text{ GHz}$, 最大辐射功率为 -11.3 dBm , 能换效率为 0.4% ^[33]。2017 年, 美国 Aghasi H 等人报道了 $0.13 \mu\text{m}$ 工艺的 0.92-THz SiGe 的四倍频太赫兹辐射源阵列。同时该团队基于非线性理论提出一种通用设计方法, 实现振荡器谐波的最大功率最优化, 其最大的辐射功率为 -10 dBm , 直流功耗为 5.73 mW ^[34]。

2014 年, 德国的 PFEIFFER U 等人发表了采用 $0.13 \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 工艺的三推式 (triple-push) 振荡器实现的 0.53 THz 太赫兹源阵列, 其频率调谐范围为 $519 \text{ GHz} \sim 536 \text{ GHz}$, EIRP 功率为 25 dBm , 能换效率为 4% ^[35]。2017 年, 美国的 JALILI H 等人发表了基于 $0.13 \mu\text{m}$ BiCMOS 工艺的 4 次谐波耦合振荡器的 2×2 的辐射源阵列, 实现了 E 面 128° 和 H 面 53° 的波束扫描宽度以及 -12.8 dBm 的辐射功率^[36]。

2018年,比利时 GUO K 等人报道了基于 28 nm Bulk CMOS 的 530GHz 的太赫兹辐射源阵列。该辐射源阵列使用交叉耦合谐波振荡器和介质透镜天线,实现了-22 dBm 的输出功率以及 0.332%的能换效率。2018年美国 HAN R 等人报道了基于 0.13 μm SiGe BiCMOS 工艺的 1 THz 辐射源阵列,利用多功能可扩展阵元形成阵列,最大辐射功率为-11 dBm,直流功耗为 1.1 W^[4],如图 6 所示。目前,国内对太赫兹辐射源阵列的研究工作还处于起步阶段,仍需要在理论分析和设计方法上进行深入研究。

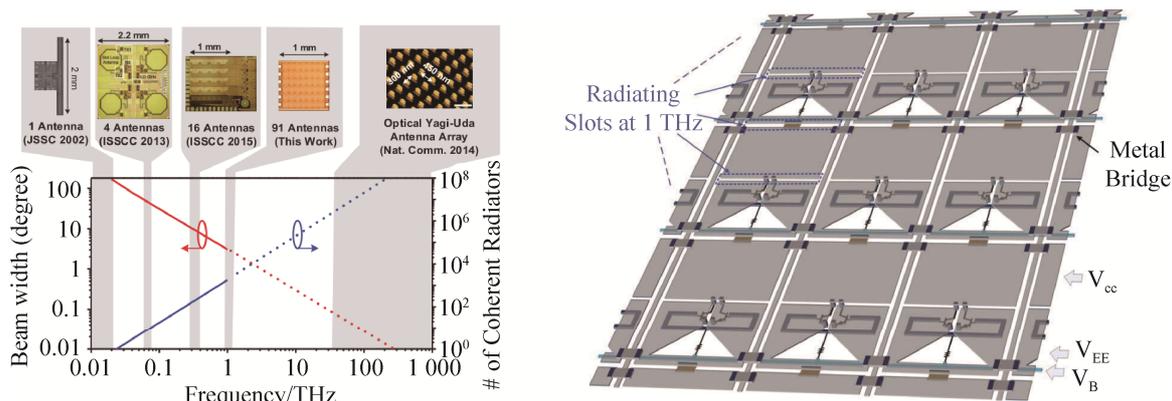


图 6 太赫兹辐射源阵列
Fig. 6 THz radiation array

6 结束语

随着太赫兹技术的发展,得益于太赫兹频段丰富的频谱资源和相对宽的频带,太赫兹频率源表现出广泛的应用前景,如超高速短距无线/有线通信、雷达、医疗、成像和遥感传感器等。目前国外在这一方向的研究较为深入,但国内相关研究刚刚起步,还缺乏对基础理论及应用的系统性研究。因此,深入开展太赫兹辐射频率源关键技术的理论及应用研究,探索太赫兹频率源关键核心电路以及太赫兹辐射源阵列电路的分析方法与设计,并对理论方法的有效性进行实验验证,具有十分重要的理论意义和实用价值。

参考文献

- [1] LEE H J, RAMI S, RAVIKUMAR S, et al. Intel 22 nm FinFET (22FFL) process technology for RF and mm wave applications and circuit design optimization for FinFET technology[C]//2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Langfang, 2018.
- [2] HEINEMANN B, RUCKER H, BARTH R, et al. SiGe HBT with f_x/f_{max} of 505 GHz/720 GHz[C]//2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2016.
- [3] YI Xiang, WANG Cheng, HU Zhi, et al. Emerging terahertz integrated systems in silicon[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems –I: Regular Papers, 2021, 68(9): 3537–3550.
- [4] ZHI Hu, MEHMET K, RUONAN H. 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.
- [5] OJEFOR E, HEINEMANN B, PFEIFFER U. Active 220- and 325-GHz frequency multiplier chains in an SiGe HBT technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(5): 1311–1318.
- [6] HAN R, AFSSHARI E. A high-power broadband passive terahertz frequency doubler in CMOS[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 63(3): 1150–1160.
- [7] NIKPAIK A, SHIRAZI A, NABAVI A, et al. A 219-to-231 GHz frequency-multiplier-based VCO with similar to 3% peak DC-to-RF efficiency in 65-nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53, (2): 389–403.
- [8] WANG Lei, XIONG Yongzhong, ZHANG Bo, et al. Millimeter-wave frequency doubler with transistor grounded-shielding structure in 0.13- μm SiGe BiCMOS technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(5): 1304–1310.

- [9] YE Y, ZHANG J, SUN X W. A W-band traveling-wave frequency doubler with output power of 9 dBm and power efficiency of 11.2%[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, 24(10): 704–706.
- [10] JIA Haikun, KUANG Lixue, WANG Zhihua, et al. A W-band injection-locked frequency doubler based on top-injected coupled resonator[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(1): 210–218.
- [11] SEOK E, CAO C, SHIM D, et al. A 410 GHz CMOS push-push oscillator with an on-chip patch antenna[C]// *Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference - Digest of Technical Papers*, San Francisco, 2008: 472–473.
- [12] LI C H, KO C L, KUO C N, et al. A 340-GHz triple-push oscillator with differential output in 40-nm CMOS[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, 24(12): 863–865.
- [13] AHMED F, FURQAN M, HEINEMANN B. 0.3-THz SiGe-based high-efficiency push–push VCOs with >1-mW peak output power employing common-mode impedance enhancement[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(3): 1384–1398.
- [14] MENG X, CHI B Y, WANG Z H. CMOS cross-coupled oscillator operating close to the transistor's f_{max} [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 27(12): 1131–1133.
- [15] ZHOU P G, CHEN J X, HONG W. Tunable 500 GHz transmitter array in SiGe technology for gas spectroscopy[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(6): 348–350.
- [16] WU L, XUE Q. E-band multi-phase LC oscillators with rotated-phase-tuning using implicit phase shifters[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, 53(9): 2560–2571.
- [17] PFEIFFER U, ÖRJFORS E. A 600-GHz CMOS focal-plane array for terahertz imaging applications[C]// *2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2008.
- [18] ÖRJFORS E, PFEIFFER U, ROSKOS H. A 0.65 THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS process technology[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, 44(7): 1968–1976.
- [19] UZUNKOL M, GURBUZ O D, GOLCUK F, et al. A 0.32 THz SiGe imaging array using high-efficiency on-chip antennas[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2013, 48(9): 2056–2066.
- [20] JAMESON S, HALPERN E, SOCHER E. A 300 GHz wirelessly locked 2×3 array radiating 5.4dBm with 5.1% DC-to-RF efficiency in 65 nm CMOS[C]// *2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, San Francisco, CA, 2016.
- [21] JALILI H, MOMENI O. A standing-wave architecture for scalable and wideband millimeter-wave and terahertz coherent radiator arrays[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(3): 1597–1609.
- [22] DENG X D, LI Y, LIU C, et al. 340 GHz on-chip 3-D antenna with 10 dBi gain and 80% radiation efficiency[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5 (4): 619–627.
- [23] WU L, LIAO S W, XUE Q. A 312-GHz CMOS injection-locked radiator with chip-and-package distributed antenna[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(11): 2920–2933.
- [24] HOU D, CHEN J, YAN P P, et al. A 270 GHz \times 9 multiplier chain MMIC with on-chip dielectric-resonator antenna[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(2): 224–230.
- [25] SEOK E. A 410 GHz CMOS push-push oscillator with an on-chip patch antenna[C]// *2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2008.
- [26] SENGUPTA K, HAJIMIRI A. A 0.28 THz power-generation and beam steering array in CMOS based on distributed active radiators[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, 47(12): 3013–3031.
- [27] TOUSI Y, AFSHARRI E. A high-power and scalable 2-D phased array for terahertz CMOS integrated systems[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2015, 50(2): 597–609.
- [28] GUO K Z, ZHANG Y, REYNAERT P. A 0.28 THz power-generation and beamsteering array in CMOS based on distributed active radiators[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, 47(12): 3013–3031 .
- [29] LI Yihu, GOH Wang Ling, LIU Chao, et al. A 324-GHz source/modulator with-6.5dBm output power[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5, (3): 412–418.
- [30] WU L, LIAO S W, XUE Q. A 312-GHz CMOS injection-locked radiator with chip-and-package distributed antenna[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(11): 2920–2933.
- [31] HOU D, CHE J, YAN P P, et al. A 270GHz \times 9 multiplier chain MMIC with on-chip dielectric-resonator antenna[C]// *2011*

- IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC), San Francisco, CA, USA, 2011.
- [32] PFEIFFER U. et al. A 0.53 THz Reconfigurable source module with up to 1 mW radiated power for diffuse illumination in terahertz imaging application[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(12): 2938–2950.
- [33] AGHASI H, CATHE A, AFSHARI E. A 0.92-THz SiGe power radiator based on a nonlinear theory for harmonic generation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(2): 406–422.
- [34] ULLRICH R P, ZHAO Y, GRZYB J, et al. A 0.53 THz reconfigurable source array with up to 1mW radiated power for terahertz imaging applications in 0.13 μ m SiGe BiCMOS[C]//2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2014.
- [35] JALILI H, MOMENI O. A 318-to-370 GHz standing-wave 2D phased array in 0.13 μ m BiCMOS[C]//2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC), San Francisco, 2017.
- [36] GUO K, STANDAERT A, REYNAERT P. A 525–556-GHz radiating source with a dielectric lens antenna in 28-nm CMOS[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(3): 340–349.

[作者简介]

- 冯林平 1989年生，博士，助理研究员/博士后，主要研究方向为低温微波毫米波集成电路与器件、超导滤波器技术。
- 易翔 1983年生，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为微波毫米波集成电路。
- 朱浩慎 1988年生，博士，副教授，博士生导师，主要研究方向为微波毫米波集成电路。
- 廖绍伟 1981年生，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为天线技术。
- 车文荃 1968年生，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为微波毫米波电路、天线技术。
- 薛泉 1966年生，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为微波毫米波集成电路与系统、天线技术。

(本文编辑：杨秀丽)