文章编号：2095-4980(2026)01-0001-12

用于太赫兹动态通信的多波束技术

杨光耀[1]，宋瑞良[1]，张乃柏[1]，邓　琨[1]，李依桐[1]，王　莹[*2]

(1.中国电子科技集团公司第五十四研究所 北京研发中心，北京 100041；
2.杭州电子科技大学 电子信息学院，浙江 杭州 310018)

摘　要：随着射频(RF)器件的不断发展，太赫兹通信正从点对点固定式通信实验向运动状态下通信应用不断演进，太赫兹波束可重构技术赋能多波束通信系统，为太赫兹动态通信提供支撑。本文介绍了相控阵、超表面以及其他太赫兹频段多波束天线的进展，梳理了太赫兹动态通信的波束重构方案与技术路线，剖析了各方案的基本构成与关键技术；通过讨论各技术路线的优势与劣势，刻画了覆盖低频到高频的太赫兹动态通信系统发展蓝图。多波束技术将进一步加快太赫兹通信向灵活多变的组网通信形式演进，为6G太赫兹通信商业化应用提供技术基础。

关键词：太赫兹通信；动态通信；太赫兹射频前端；波束可重构；相控阵；超表面

中图分类号：TN821　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11805/TKYDA2024528

Multibeam technology for terahertz dynamic communication

YANG Guangyao[1]，SONG Ruiliang[1]，ZHANG Naibo[1]，DENG Kun[1]，LI Yitong[1]，WANG Ying[*2]

(1.Beijing Research and Development Center，The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation，Beijing 100041，China；2.School of Electronics and Information，Hangzhou Dianzi University，Hangzhou Zhejiang 310018，China)

Abstract: With the continuous development of Radio Frequency(RF) devices, terahertz communication is evolving from point-to-point fixed communication experiments to communication applications in the moving state, and terahertz beam reconfigurable technology empowers multi-beam communication systems to provide support for terahertz dynamic communication. This paper introduces the research progress of phased array, meta-surface and other multibeam antennas in terahertz bands. The beam reconfiguration schemes and technical routes of terahertz dynamic communication are sorted out. The basic composition and key technologies of each scheme are analyzed. By discussing the advantages and disadvantages of each technical route, the development blueprint of terahertz dynamic communication system covering low frequency to high frequency is described. Multibeam technology will further accelerate the evolution of terahertz communication to flexible and changeable networking communication forms, and provide a technical foundation for the commercial application of 6G terahertz communication.

Keywords: terahertz communication; dynamic communication; terahertz RF front end; beam reconfiguration; phased array; meta-surface

太赫兹波指0.1~10 THz(波长30 μm~3 mm)频段范围内的电磁波，由Fleming于1974年首先提出。作为21世纪的重大新兴科学技术领域之一，太赫兹的应用一直被局限于成像与传感领域，这是由于太赫兹通信系统射频器件的稀缺性。随着通信技术不断演进，世界范围内对于更高数据速率和更低延迟通信的需求进一步耗尽了低频频谱资源，使太赫兹频段开始进入通信领域的研究范围。太赫兹频段通信集成了微波通信与光通信的优点，

收稿日期：2024-08-31；**修回日期：**2024-11-20

[*]**通信作者：**王　莹　email:90023@hdu.edu.cn

引用格式：杨光耀,宋瑞良,张乃柏,等. 用于太赫兹动态通信的多波束技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2026,24(1):1-12. DOI:10.11805/TKYDA2024528.

Citation format: YANG Guangyao,SONG Ruiliang,ZHANG Naibo,et al. Multibeam technology for terahertz dynamic communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2026,24(1):1-12. DOI:10.11805/TKYDA2024528.

具有传输速率高、容量大、方向性强、安全性高以及穿透性好等诸多特性，使太赫兹通信系统成为太赫兹研究的一个重要领域。目前，太赫兹通信原型系统仍基本处于点对点固定式通信，但在诸如卫星间、卫星与飞船间、太空探测器间以及无人机群间等典型动态应用场景中，需对太赫兹波进行更灵活的调控。多波束技术作为太赫兹通信系统的主要一环，其波束扫描方式与波束形成性能直接影响通信覆盖范围，本文从太赫兹频段多波束技术路线出发，总结了不同系统的特点、关键技术以及国内外研究现状，探讨了在技术攻关中面临的挑战。此外，通过比较不同波束扫描方式的优劣势，讨论了从低频到高频太赫兹动态通信射频系统的发展路线和未来展望。

1 固态相控阵方案

1.1 概念与关键技术

相控阵天线是主动辐射式天线，通过对各阵列单元的幅度和相位进行调控实现灵活的波束控制。传统相控阵系统中，同步信号通过链路进入相应的发射或接收通道，使用移相器为每个阵列单元分配适当的相位加权。发射端利用功率放大器产生足够高的功率，然后由片上集成天线阵列辐射出去；而接收信号则首先进入低噪放，再通过混频器进入中频信号处理链路。图 1 为太赫兹相控阵关键射频器件 T/R 芯片架构，该芯片通常集成了同步、移相、衰减与放大，而混频链路则视阵列尺寸情况合理放置。

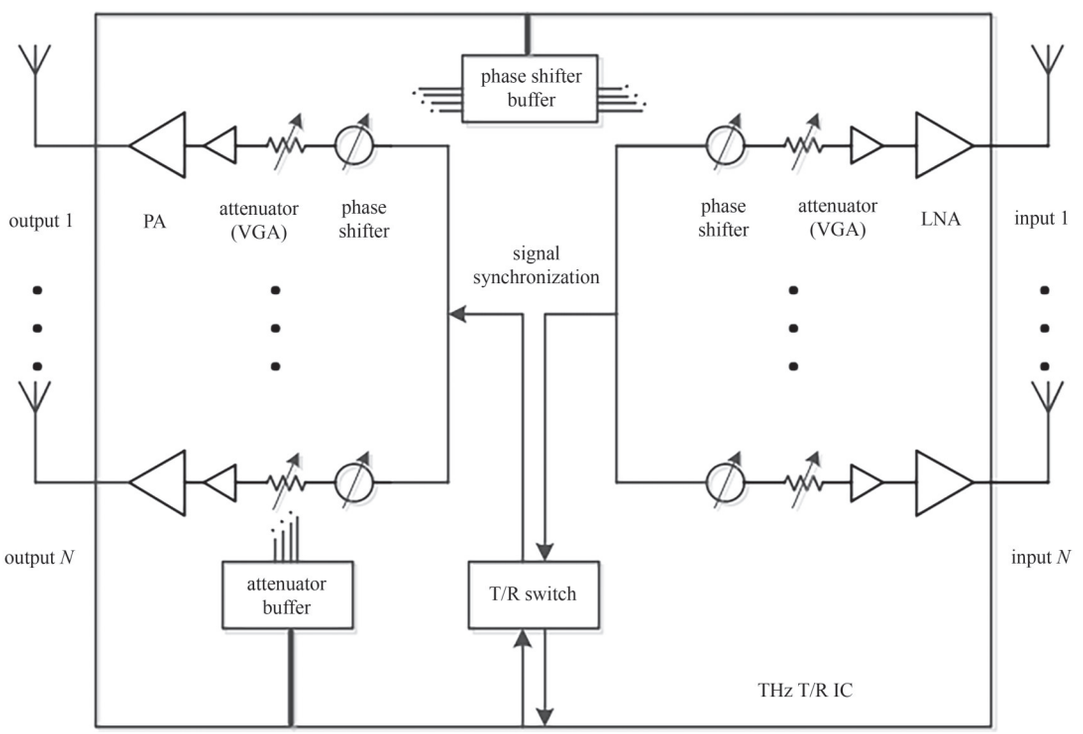


Fig.1 Typical T/R chip of terahertz phased array
图 1 典型太赫兹相控阵 T/R 芯片

太赫兹相控阵并非均是按照混频方式产生源信号，但对太赫兹波前进行调控，通过相应技术产生太赫兹信号(或电磁波)并进行移相放大操作则是必要的。

太赫兹频率源负责产生太赫兹信号，是太赫兹通信系统的基本核心元件。目前商用太赫兹源采用 III–V 族半导体技术，但由于其截止频率低以及加工集成成本高等原因，限制了相控阵向高频发展。近年来，硅基工艺的进步使金属氧化物半导体(Metal–Oxide–Semiconductor，MOS）管工作频率不断提升[1–2]，低廉的成本与易集成性使其具有广阔应用前景。太赫兹高频信号可通过倍频器、振荡器以及共振隧穿二极管等有源器件得到。通过倍频方法结合异质结双极型晶体管(Heterojunction Bipolar Transistor，HBT)、高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor，HEMT)、互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor，CMOS)工艺产生的太赫兹信号具有稳定性好、频带宽、调制深度深等优点[3]，但可实现的频率较低，成果集中于 W 波段至 D 波段频率区间；而振荡器则具有器件面积小，能量转换效率高，工作频率高等优点[4–5]，但其调谐范围窄，且频率不稳定。近年来采用 CMOS 工艺制作振荡器已成为研究热点，与 III–V 族半导体的性能差距正在缩小[6]。

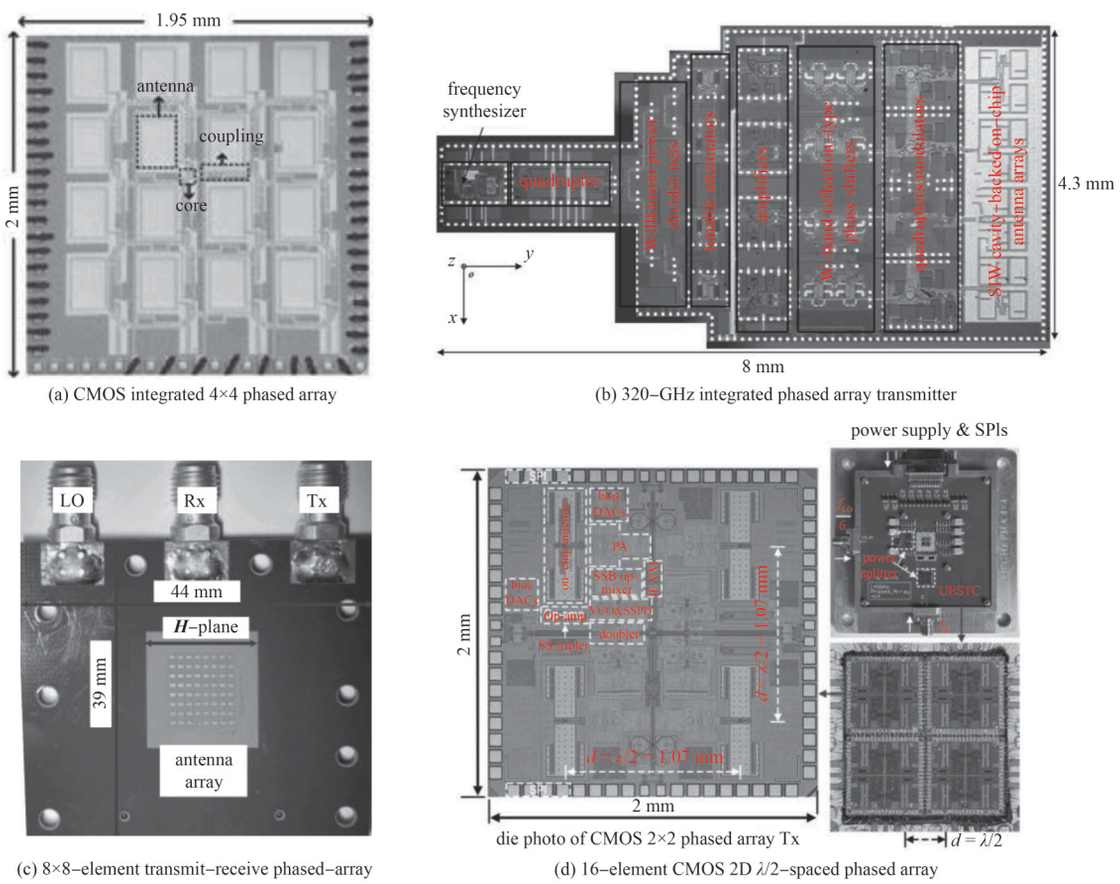
太赫兹功率放大电路负责对太赫兹信号进行放大，以便其进入下一级信号处理；功放决定了通信系统的距

离覆盖范围。目前太赫兹频段放大器件多采用InP HBT/DHBT(Double Heterojunction Bipolar Transistor)制作，该类型器件具有低噪声、宽频带与高线性度的特点[7]。通过功率合成技术或级联多级放大器可提升放大电路的最终输出功率，但因尺寸和转换效率问题，太赫兹频段功放目前并不成熟，成果集中于W波段至D波段频率区间[8−10]。

太赫兹天线阵列负责对太赫兹电磁波进行发射与接收，也是太赫兹辐射源的重要组成部分。随着太赫兹技术与半导体工艺相结合，天线阵列具有了更高的加工精确度与自由度[11]。通过将天线阵列与上述射频电路进行封装集成，可大大减小太赫兹频段传输线互连带来的金属损耗和介质损耗，提升整体辐射效率。但由于天线单元尺寸与电磁波长正相关，太赫兹频段天线极其微小，给相控阵前端射频设计带来了不小的挑战[12−13]。

1.2 研究现状

2014年，美国IBM公司基于65 nm bulk CMOS工艺，利用多振荡器、耦合器和移相器实现了单元间相位同步和相位控制，在340 GHz频率下加工实现了4×4相控阵芯片，如图2(a)所示，其峰值等效全向辐射功率(Equivalent Isotropic Radiated Power，EIRP)为17.1 dBm，1 MHz频偏相位噪声为−93 dBc/Hz；并最终完成了一款拥有大输出功率的硅基相控阵芯片，其移相器采用压控变容二极管，但该芯片并没有加载衰减器和功率放大器，因此无法对幅度进行调整[14]。2015年，熊永忠教授团队报道了基于0.13 μm SiGe BiCMOS工艺的相控发射机，如图2(b)所示，实现了最大EIRP为10.6 dBm以及±12°波束扫描范围[15]。2017年，美国的H JALILI等[16]发表了基于0.13 μm 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。



(a) CMOS integrated 4×4 phased array　(b) 320−GHz integrated phased array transmitter

(c) 8×8−element transmit−receive phased−array　(d) 16−element CMOS 2D λ/2−spaced phased array

Fig.2 Research progress of terahertz phased arrays

图2 相控阵进展

2023年，美国加州理工Reibeiz教授团队利用GlobalFoundries CMOS 45RFSOI(45 nm Radio Frequency Silicon−On−Insulator)工艺实现了8×8阵元140 GHz可扩展晶圆级收发相控阵，如图2(c)所示。系统采用射频波束成形，在135~145 GHz范围内具有4位相位和增益控制，并集成了上下变频链路。该阵列扫描范围为±60°，并进行发射和接收，发射端EIRP在140 GHz时为37.5 dBm；接收阵列输入功率1 dB压缩点为−11 dBm，140 GHz时增益为20 dB。该阵列支持高达24 Gb/s的16/64正交振幅调制(Quadrature Amplitude Modulation，QAM)传输[17]。2024年，

中国电子科技大学张波教授团队利用65 nm CMOS工艺实现了134~141 GHz的16阵元二维发射相控阵，如图2(d)所示，集成了本振与中频链路，可进行进一步的阵列扩展，4×4阵列的EIRP为26 dBm，每个单元通道的射频输出功率为1 dBm，二维波束扫描均覆盖±40°，已证明在10 m距离上可传输14 Gbit/s的16QAM信号[18]。

从上述介绍中可知，相控阵系统集成度高，调控自由度高，性能稳定，还可在单元处提升链路增益，是多波束系统中最具有实际应用潜力的方案。但随着天线单元工作频率上升至太赫兹波段，天线尺寸大大缩小，从太赫兹传输线路到射频器件的设计，再到加工和集成过程，实现上极其复杂。近年来，毫米波频段的相控阵产品已逐渐成熟，随着国际上对于太赫兹固态相控阵器件研究的进一步深入，工作在更高频率的成熟太赫兹相控阵系统将很快产生。

2 智能超表面方案

2.1 概念与关键技术

超表面天线一般是被动辐射式天线，可直接作用于空间中的太赫兹电磁波，实现对波前幅度、相位和极化的自由调控。根据不同功能，可将太赫兹智能超表面进行简单分类，分为幅度调控超表面[19]、相位调控超表面[20]、极化调控超表面[21]与波束调控超表面[22]。对于波束调控超表面，其可实现波束扫描、波束聚焦与任意波束赋形。波束调控超表面是一种设计自由度很高的方案，通过利用液晶[23]、半导体器件[24]、二维材料[25]、相变材料[26]与微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System，MEMS)[27]等手段对超表面上的行、列或单元进行特异化调控，实现单/多/任意波束。波束调控超表面可分为透射式与反射式两种，虽然相位调控方法不同，但均是根据对有限位置或无穷远点不同位置的聚焦需求，反向推算超表面上的相位分布，从而实现对太赫兹波波束的任意调控。图3为典型的反射式太赫兹智能超表面，该系统集成了馈源、超表面阵列、调控中介层与控制电路等主要结构。智能超表面技术不受射频器件限制，已有成果的频率范围覆盖整个太赫兹频段，并向上延伸至远红外和光学频段，向下延伸至微波与毫米波频段。

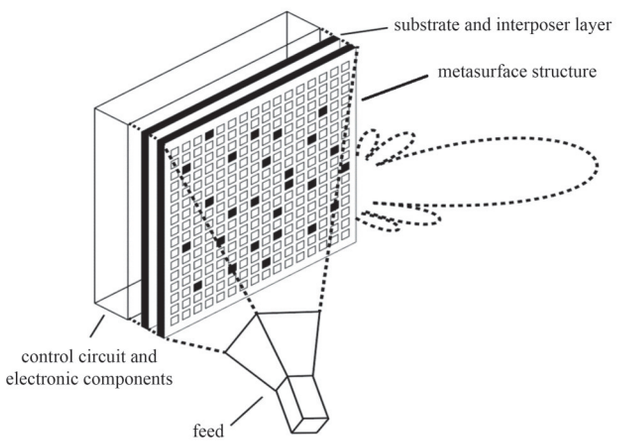


Fig.3 Typical terahertz reconfigurable intelligence surface
图3 典型太赫兹智能超表面

超材料调控技术是智能超表面的核心技术之一，决定了超表面的功能和调谐范围。超材料的主要调控机制包括机械调控、温度调控、电调控与非线性光学调控等[28]。太赫兹动态超材料单元设计与相对应的相位调控技术相关，两者共同决定了单元调控范围。通过将单元调控到不同相位角度，单元间相位差与单元间距共同影响波束合成方向。通常的做法是将单元的不同角度归为bit位，在0°~360°范围内均匀采样：如1-bit反射超表面阵列内包含0°与180° 2种bit位，而2-bit阵列则包含0°、90°、180°与270° 4种bit位。当bit数越多，波束合成效果越好，但调控难度也会成倍数增大。

波束优化方法是智能超表面中另一个关键技术，通过实时动态编码超表面，甚至可以实现时空同时调制[29]。波束对应的控制编码通常是由波束优化方法预先计算存储在现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array，FPGA)中，但对于复杂运动场景，存储的编码矩阵很难完全覆盖。因此对于包含数千个阵元的大规模智能超表面，波束优化方案的高效性和准确性至关重要。传统波束形成通过后向散射和非线性优化方法实现，前者通过给定辐射方向图的逆傅里叶变换计算超表面上相位分布，适用于单个波束形成；后者则适用于同时多波束的形成，还可对旁瓣进行针对性优化。非线性优化方案包括遗传算法[30]与粒子群算法[31]等，通过迭代最小化所需波束与形成波束之间的差异，但该类算法复杂，无法提供实时响应。此外，深度学习也可通过多层神经网络从具有普适性的数据中“学习”波束形成原理，从任意波束形成编码矩阵[32]。

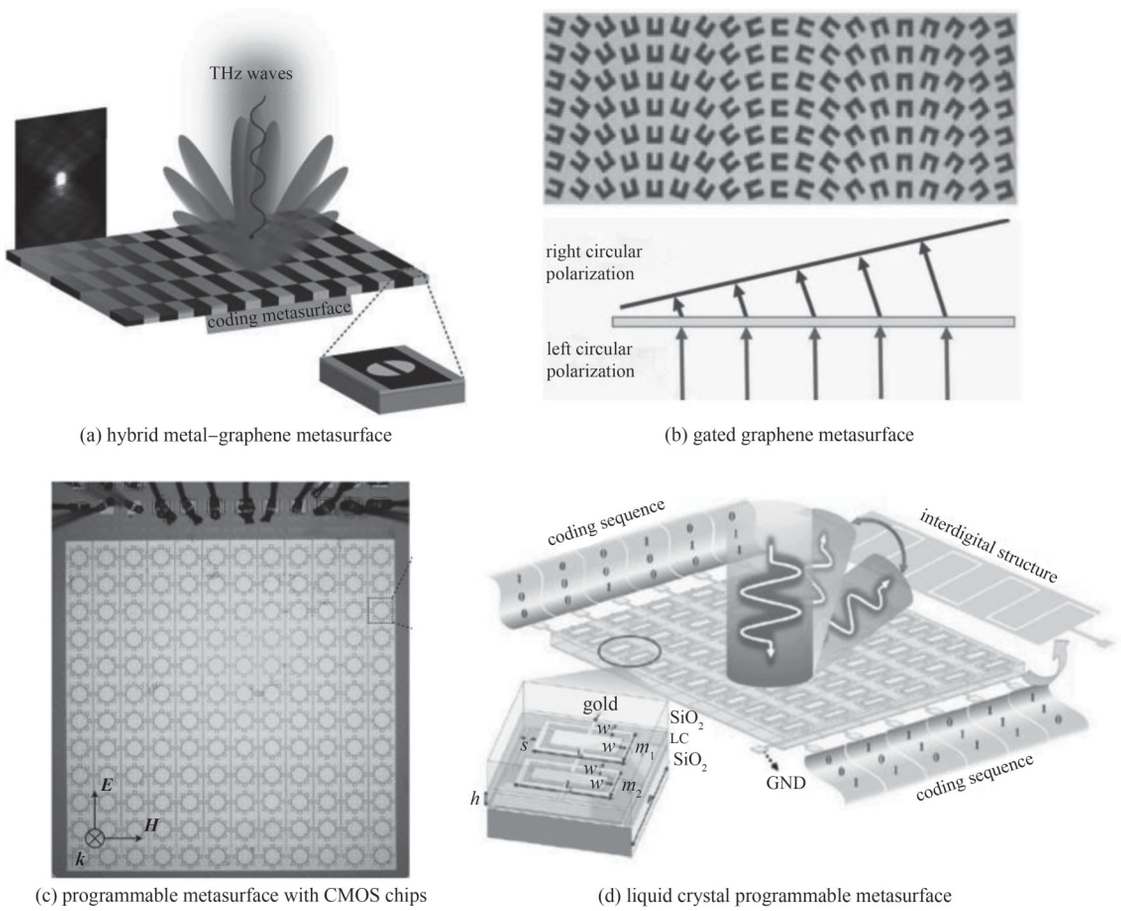
超表面加工也是太赫兹频段超表面的一大难点，印制电路板(Printed Circuit Board，PCB)控制电路需要与微小的太赫兹超表面单元互连，这对天线封装与扇出中介层技术提出了更高要求。

2.2 研究现状

在超表面研究方面，中国与国外研究进展相当，研究人员提出了基于不同类型调控方式的太赫兹超表面。2018年，中国天津大学ZHANG等[33]提出了一种石墨烯结合金属结构的反射式超表面，通过控制石墨烯的费米能

级实现超表面单元在0–1编码间切换。该单元结构在4.4 THz频段相位差可达到180°，其功能与实现方式如图4(a)所示，通过合理排布0–1编码，可实现对称的波束分裂效果。同年，英国伯明翰大学Kim等[34]提出了一种按梯度分布倾斜摆放的太赫兹动态超表面，单元结构受统一的信号控制，通过调整其放置角度可控制反射的相位，如图4(b)所示。利用石墨烯调控作用后的太赫兹波反射，在实测中于1.15 THz频率处实现了20°的偏转波束动态调控。

2020年，美国普林斯顿大学Venkatesh等[35]提出利用CMOS编码太赫兹超表面，其在每个环形单元上使用8个独立控制的开关，最多可实现84种不同的开口谐振状态，在0.3 THz实现了±30°的多波束扫描，如图4(c)所示。通过让单元处于其中3种不同的谐振状态，演示了波束形状在P形与U形之间切换的场景。



(a) hybrid metal–graphene metasurface　(b) gated graphene metasurface

(c) programmable metasurface with CMOS chips　(d) liquid crystal programmable metasurface

Fig.4 Research progress of terahertz reconfigurable intelligence surfaces

图4 太赫兹智能超表面进展

2022年，中国南京邮电大学LIU等[36]基于液晶材料提出了一种准2–bit的太赫兹动态超表面，如图4(d)所示。该超表面将不同单元两两合成一组，并通过控制单元底部的液晶电磁特性与控制信号编码，在0.323 THz处实现了最大±21°的波束扫描角度。此外，中国东南大学崔铁军院士团队在毫米波与太赫兹超表面研究领域有独到见解与技术优势[37]。

总体而言，智能超表面方案一定程度上丰富了器件功能的多样性，有利于减少太赫兹系统器件数量，降低系统复杂性，在低成本的前提下实现了灵活的波束控制能力，是未来太赫兹动态通信系统迈向实际应用的先驱和助力。

3　反射天线方案

3.1 概念与关键技术

反射多波束天线一般包括常规反射面天线与反射阵天线，如图5所示。反射面天线通常由馈源和反射面组成。馈源为弱方向性天线，如喇叭天线、阵子天线，反射面为各种抛物曲面、球面或者平面。反射面天线结构简单，性能优越，是卫星通信中应用最为广泛的一种天线形式，卫星通信中常用的卡塞格伦天线就是典型的反

射面天线。反射面天线的关键技术在于发射机/馈源、反射面材料和高精确度加工。在太赫兹频段，反射面系统发射机中的射频器件和相控阵系统不同，其所用器件以模块为主，基本不受尺寸限制，但如何提升高频链路效率仍是一大挑战；馈源多选用单个或多个喇叭天线、阵列天线等，太赫兹频段反射面在馈源与反射面设计上与低频并无明显不同，但太赫兹馈源口面小，可减轻遮挡影响，实现更灵活的配置；太赫兹反射面结构小巧，已用于射电天文、星载探测器和成像雷达上，天线整体重量至关重要，反射面材料需采用高导电率的金属杆/网/层，辅以轻量化的骨架材料，可在降低损耗的同时实现轻小型化和高增益性能；随着频率上升到太赫兹，如何实现光滑高精确度反射面的加工也是关键问题之一。

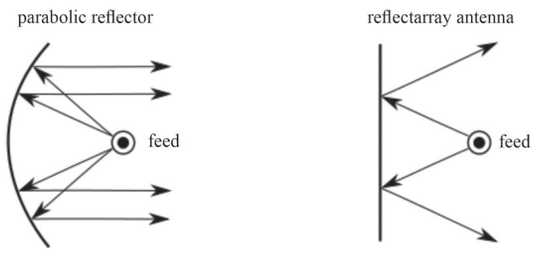
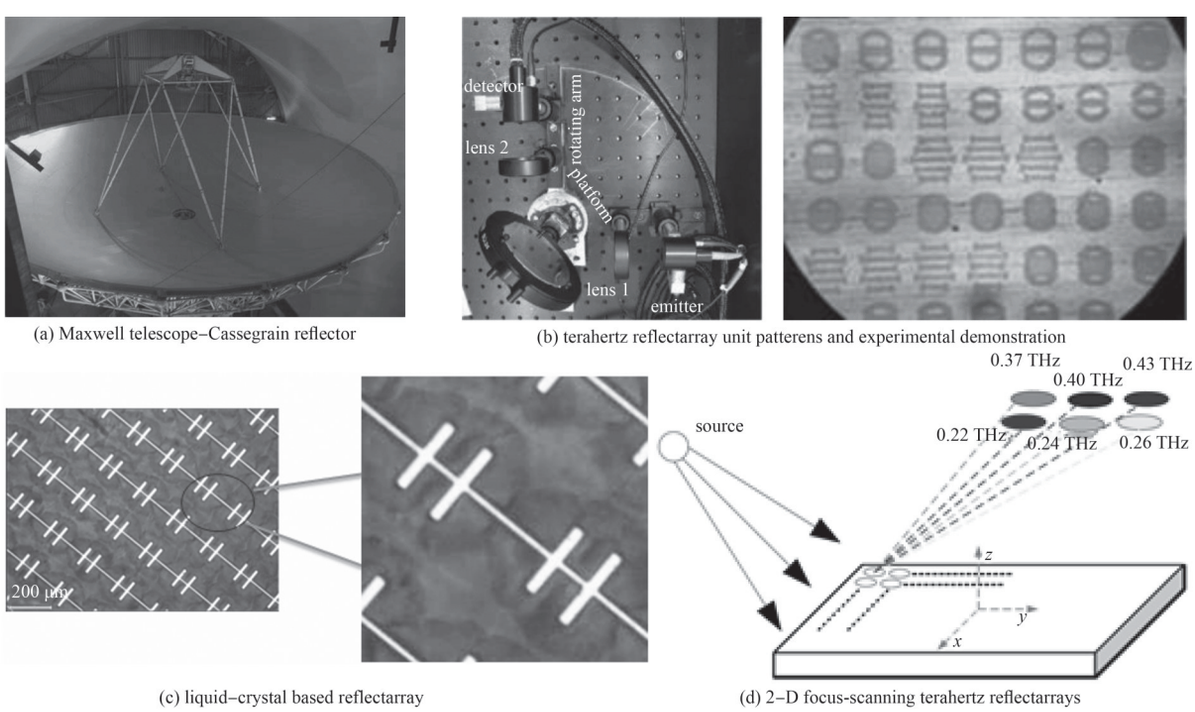


Fig.5 Typical terahertz reflector antenna
图5 典型太赫兹反射天线

反射阵天线是在反射面天线的基础上改进而来，也是由馈源和反射平面两部分组成，但反射阵天线的反射面不再像反射面天线一样为金属面，而是由介质板和周期性排列在其上的大量反射单元共同组成。工作时，馈源天线将电磁波辐射至阵列上的反射单元，每个反射单元对入射的电磁波进行相位补偿，所有反射单元反射的电磁波在目标方向上会同相叠加，形成预期波束。但固定反射单元对入射电磁波的相位补偿能力通常是有限的，无法实现动态的相位补偿，但反射阵可通过倾斜反射平面角度，或与智能超表面方案相结合，以多种调控方式改变反射相位梯度，实现太赫兹波束偏转[38]。

3.2 研究现状

太赫兹反射面天线在2000年之前就开始用于地基射电天文望远镜中，1987年，英国和荷兰联合研制的詹姆斯·麦克斯韦望远镜就使用了15 m口径卡塞格伦反射面，如图6(a)所示，其工作在220~720 GHz宽带太赫兹频段，加工精确度达到10 μm，且可调节焦距[39]。随着新材料、新设计和加工工艺的不断研究，太赫兹反射天线已应用到天基遥感、成像和通信领域。



(a) Maxwell telescope–Cassegrain reflector
(b) terahertz reflectarray unit patterens and experimental demonstration
(c) liquid–crystal based reflectarray
(d) 2–D focus-scanning terahertz reflectarrays

Fig.6 Research progress of terahertz reflector antennas
图6 太赫兹反射天线进展

2013年，清华大学杨帆教授团队提出了太赫兹反射阵天线概念[40]。最初的反射阵天线仅为固定阵面，平面上的金属图形能对不同频率太赫兹波产生不同的相位影响，以此产生多波束特性[41]，如图6(b)所示。而后研究人员在反射阵衬底或金属单元图形上增加可重构器件，将反射面的调控自由度打开，实现特定方向的偏折波束。2017年，合肥工业大学提出了一种基于液晶衬底的反射阵天线，通过电压控制液晶的等效介电常数，从而实现

相位变化，如图 6(c)所示。该天线工作于 330~338 GHz，相移超过 250°[42]。2019 年，电子科技大学提出了一种太赫兹双频二维聚焦扫描反射阵，如图 6(d)所示，工作在 300 GHz，可通过不同图形单元分别调控临近频点处的相位，最终实现波束偏折和扫描[43]。

反射面天线的多波束实现依赖伺服系统，伺服的精确度决定了波束扫描的角度，引入伺服系统后通常会面临整体天线重量增加，尺寸增大的问题；而反射阵天线综合了反射面和相控阵的优势，设计上具有更高自由度，且系统复杂度会大大降低。

4　透镜天线/漏波天线方案

4.1 概念与关键技术

透镜天线与漏波天线是在传输过程中通过改变辐射太赫兹波前的相位实现偏转波束产生的多波束天线方案。透镜天线是典型的透射型天线，通过透镜轮廓或介电常数变化实现波，可在太赫兹频段实现涡旋波[44]、贝塞尔波束[45]、极化转换[46]与极化分束[47]等特殊波束，具有代表性的透镜天线是龙勃透镜(Luneberg 透镜)。太赫兹频段龙勃透镜可通过介质分层、混合介质材料、周期性人工材料和电磁带隙等技术实现，通过从不同方向将太赫兹波馈入透镜使波束聚焦并从对向辐射[48]。漏波天线则是一类独特的多波束天线结构，在行波传输线路上增加周期性辐射结构，不同频点波长不同，导致辐射结构间相位差异不同，最终实现波束偏转。图 7 为典型的透镜天线与漏波天线，两种类型天线加工结构简单，波束扫描成本低，在太赫兹频段具有优势，也成为一个重要的研究热点。

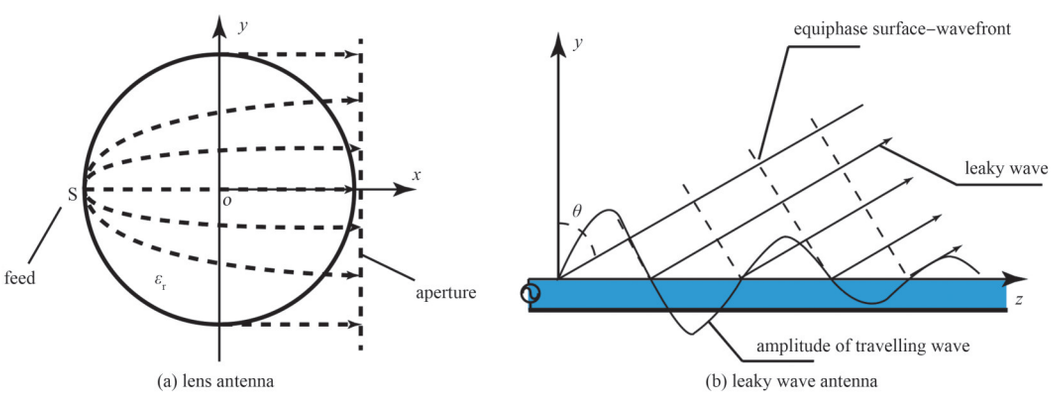


Fig.7 Typical terahertz lens antenna and leaky wave antenna

图 7　典型透镜天线与漏波天线

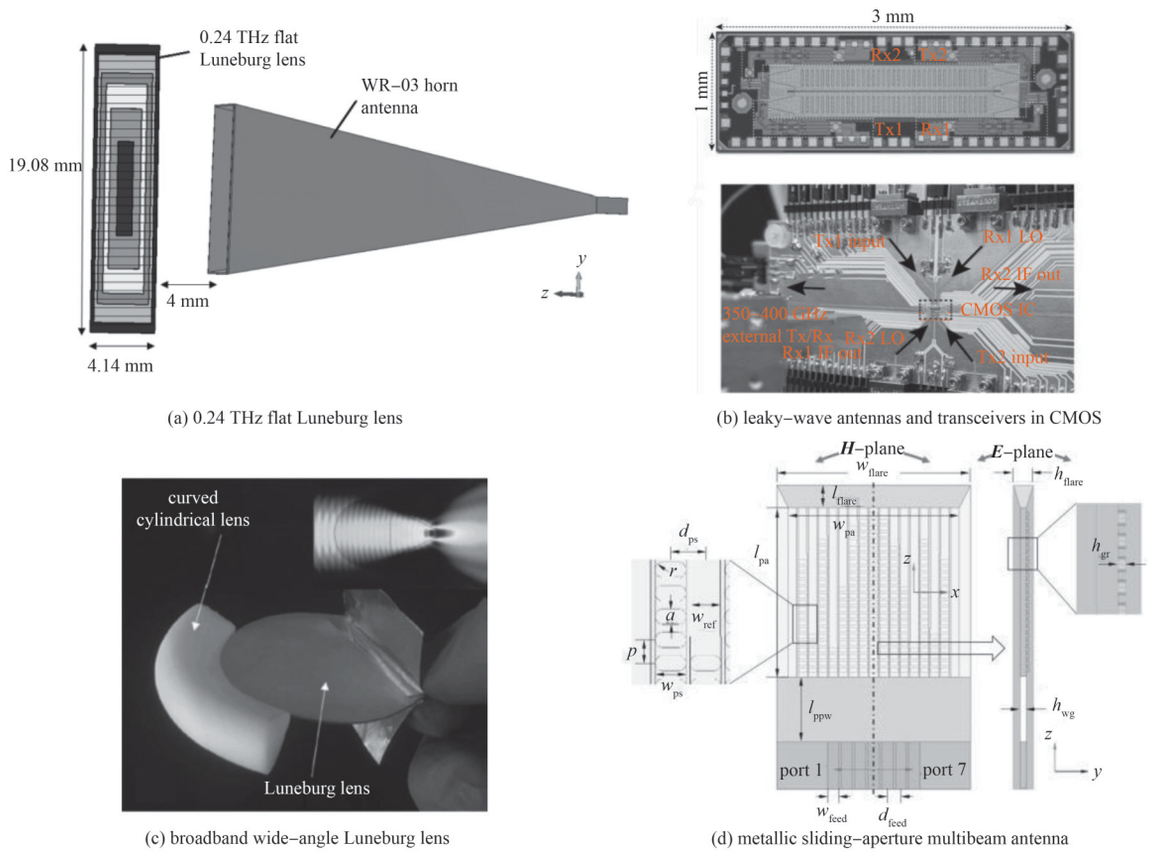
天线结构形式与应用材料是多波束天线的关键技术，太赫兹透镜天线具有强大的波束控制能力，且在低频太赫兹具有高增益的优势；漏波天线具有很高的灵活度，可实现多种波束调控功能。频率上升到太赫兹波段后，多波束天线的结构不再庞大笨重。随着半导体工艺在太赫兹天线加工中不断应用，其加工集成难度也逐渐下降。透镜天线在太赫兹频段多采用介质设计，如硅[49]、耐高温树脂[50]、高分子材料[51]等，也可通过介质–金属型超材料实现等效介电常数；漏波天线与超材料结合，通过特殊馈电传输线结构可实现时空调制。

4.2 研究现状

2019 年，英国伦敦玛丽女王大学 Andy 等[52]提出了一种全介质龙勃透镜结构，在 Rogers RT/duriod 6010 基板上采用周期性通孔实现渐变折射率，如图 8(a)所示，最终在 240 GHz 频段实现了±8°的波束扫描覆盖。2021 年，美国普林斯顿大学 H Saeidi 等[53]提出了一种基于基片集成波导的漏波天线，如图 8(b)所示，工作在 360~400 GHz 频段，能覆盖±40°的空间角度，并演示了在 200 Hz 带宽下的一维无线节点定位效果。

2021 年，美国布朗大学 Amarasinghe 等[54]提出了 130~180 GHz 频段广角波束龙勃透镜，如图 8(c)所示，通过在透镜前端增加一个直径为 1 mm 的聚苯乙烯曲面圆柱形透镜，消除了垂直于透镜平面方向上的衍射。该天线拥有 50°的单波束，且将透镜大约平移 2.6 cm 时可产生超过 70°的波束偏转。2024 年，中国北京理工大学 LU 等[55]提出了基于金属销钉结构的波导漏波多波束天线，如图 8(d)所示，利用全 CNC(Computerized Numerical Control)加工并提出低色散波导滑动移相结构，在 400 GHz 以上实现了多波束方案。

模拟多波束天线种类繁多，在太赫兹频段发展迅速，众多研究单位均提出独特的多波束结构用于太赫兹通信系统原型中。



(a) 0.24 THz flat Luneburg lens

(b) leaky−wave antennas and transceivers in CMOS

(c) broadband wide−angle Luneburg lens

(d) metallic sliding−aperture multibeam antenna

Fig.8 Research progress of terahertz lens antennas and leaky wave antennas

图8 太赫兹透镜天线/漏波多波束天线研究进展

5 研究路线讨论

从上文综述情况可知，对于多波束动态通信，相控阵方案是比较稳定且循序渐进的方案，但在当前太赫兹射频器件亟待进一步研究的情况下，在低频太赫兹开展功放、低噪放、移相器、衰减器等相控阵关键器件的研究，而在较高频段开展频率源研究，采用超表面或多波束天线方案，可进行太赫兹动态通信预先验证。表1给出了上文提到的多波束方案对比。

表1 太赫兹多波束方案对比

Table1 Comparison of terahertz multibeam schemes

antenna scheme category	implementation cost	frequency distribution	scanning range	operating efficiency
phased array	high	<200 GHz	relatively high	relatively low
metasurface	low	full terahertz band	high	relatively low
reflector antenna	relatively high	<1000 GHz	relatively low	high
reflectarray antenna	low	<500 GHz	relatively high	relatively low
lens antenna	relatively low	<300 GHz	relatively high	low
leaky wave antenna	relatively high	<500 GHz	low	low

相控阵方案在太赫兹多波束方案中属于系统较为复杂，成本高，但性能较稳定的一种。高频信号生成、功放效率、链路衰减、T/R多功能芯片集成、阵面校准与应用等问题都是制约相控阵向高频发展的因素。现今具有完备波束调控功能和一定规模的太赫兹相控阵基本工作在200 GHz以下，随着频率提升，T/R组件中功放效率降低，链路衰减提升。

超表面方案具有设计自由度高、系统复杂度低、成本较低的优点，工作频率基本覆盖从微波到光学的全部频段。太赫兹超表面的主要制约因素是调控阵列规模和阵面效率，随着频率提升，调控器件损耗变大，阵面的总体效率将降低。

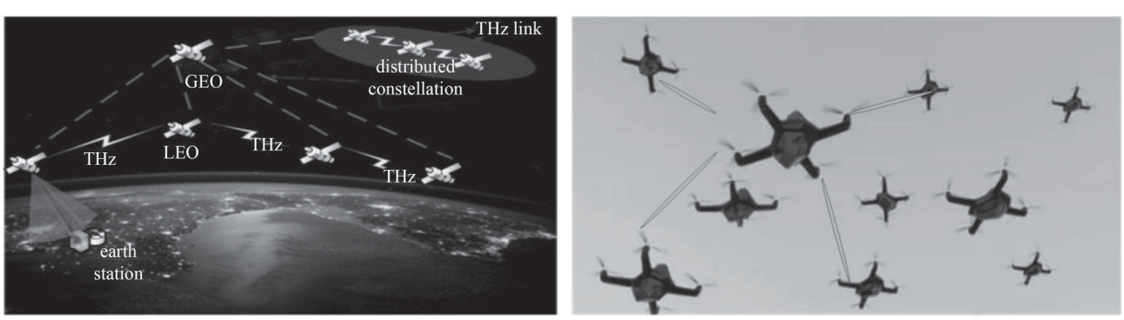
反射面方案是最早投入应用的太赫兹波束可重构天线形式，该方案性能稳定且效率高，但系统体积和重量大，扫描速度慢。由于反射面天线的设计基于光学原理，其工作频率只与馈源有关。但随着频率上升，射频性能对反射面的材料和加工精确度提出了更高要求，因此加工成本较高。

传统反射阵方案缺乏相位调控的自由度，其扫描范围较窄，加工简单。但在近年研究中，反射阵天线向反射型超表面逐渐靠拢，与超表面的边界定义逐渐模糊。通过在衬底或单元中引入可重构调控方案，使其扫描范围提升。随着工作频率上升，其辐射效率也因为调控方案的损耗增加而下降。

透镜天线方案的设计自由度高，扫描范围较宽，加工方法也较多，但因该方案发射和接收过程中太赫兹波要穿过高介电常数的透镜材料，其工作效率偏低，主要成果分布在低频太赫兹频段。在毫米波频段，龙勃透镜已用于通信产品，而在太赫兹频段的成果仍处于实验室研究阶段。

传统漏波天线基于传输线行波结构，实现形式多样且加工成本低，该方案主要难点是扫描波束带宽窄，不同频点指向角度不同。近年来，漏波天线也与时空调制超表面结合，具有了更灵活的波束调控方案。随着频率上升，传输线加工难度上升，成本增加。

目前，太赫兹通信已从低频端开始进行试验应用。对于传统低速应用而言，稳定性和可靠性尤为重要，反射面附加伺服方案与相控阵方案在这方面具有突出优势。而对于高频太赫兹通信链路验证系统而言，成本较低的超表面、反射阵、透镜天线方案则更为合适。在如图9(a)所示的低轨卫星组网和高低轨卫星通信链路中，反射面与相控阵等太赫兹系统将能提供更先进的高容量大带宽方案；在如图9(b)所示无人机蜂群组网场景下，高频太赫兹系统则可提供轻小型化的收发前端，并具备抗干扰的天然优势。太赫兹源是所有多波束方案的必要器件，针对高频太赫兹源的研究也将引领多波束系统向更高频率演进。



(a) communication link between satellites　　(b) communication link between drones

Fig.9 Typical application scenarios of terahertz dynamic communication

图9 典型太赫兹动态通信应用场景

6　结论

随着通信频段逐渐从微波、毫米波提升至太赫兹，通信速率与通信带宽的提升也对动态通信系统提出了更高要求。当前太赫兹动态通信系统研究正在世界各地如火如荼展开，多波束技术作为系统动态能力的基石，已成为太赫兹通信技术中必须攻克的难关。在这个领域，国外起步早且研究深入，已将原理样机用于通信实验；而国内虽布局较晚，但已在加速追赶，并不断有细分领域涌现出颠覆性成果。因此，在6G真正到来之前，深入开展太赫兹相控阵、太赫兹智能超表面与太赫兹多波束天线关键技术研究，探索太赫兹动态通信系统发展路线和性能极限，具有尤为重要的意义。本文总结了不同多波束方案的特点、关键技术以及国内外研究现状，探讨了在技术攻关中面临的挑战，讨论了从低频到高频太赫兹动态通信射频系统的发展路线和未来展望，期望更多研究人员投入到太赫兹多波束技术研发，共同推动太赫兹通信向前发展。

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). San Francisco,CA,USA:IEEE, 2018:14.1.1–14.1.4. DOI:10.1109/IEDM.2018.8614490.

[2] HEINEMANN B,RÜCKER 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). San Francisco,CA,USA:IEEE, 2016:3.1.1–3.1.4. DOI:10.1109/IEDM.2016.7838335.

[3] 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. (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.) DOI:10.12347/j.ycyk.20210914001.

[4] SEOK E,CAO C H,SHIM D,et al. A 410 GHz CMOS push-push oscillator with an on-chip patch antenna[C]// 2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference:Digest of Technical Papers. San Francisco,CA,USA:IEEE, 2008:472–629. DOI:

10.1109/ISSCC.2008.4523262.

[5] 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. DOI:10.1109/LMWC.2014.2352936.

[6] MENG Xiangyu, CHI Baoyong, WANG Zhihua. CMOS cross-coupled oscillator operating close to the transistor's f_{max}[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017,27(12):1131-1133. DOI:10.1109/LMWC.2017.2752965.

[7] 李尧,高岩,张浙,等. 太赫兹固态通信系统技术发展现状与挑战[J]. 无线电通信技术, 2024,50(1):41-57. (LI Yao,GAO Yan, ZHANG Xi, et al. Overview of terahertz solid-state communication system technology development status and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2024,50(1):41-57.) DOI:10.3969/j.issn.1003-3114.2024.01.005.

[8] WANG H. Power amplifiers performance survey 2000-present[DB/OL]. [2023-10-18]. https://ideas. ethz.ch/Surveys/pa-survey.html.

[9] ZHU Wei,WANG Jiawen,WANG Ruitao,et al. A 1 V 32.1 dBm 92-to-102 GHz power amplifier with a scalable 128-to-1 power combiner achieving 15% peak PAE in a 65 nm bulk CMOS process[C]// 2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). San Francisco,CA,USA:IEEE, 2022:318-320. DOI:10.1109/ISSCC42614.2022.973.

[10] KOBAYASHI K W,KUMAR V. A broadband 70~110 GHz E-/W-band LNA using a 90-nm T-Gate GaN HEMT technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021,31(7):885-888. DOI:10.1109/LMWC.2021.3076360.

[11] PFEIFFER U A,ZHAO Y,GRZYB J,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. DOI:10.1109/JSSC.2014.2358570.

[12] WU Liang,LIAO Shaowei,XUE Quan. 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. DOI:10.1109/JSSC.2017.2727046.

[13] LI Y H,GOH W L,LIU C,et al. A 324 GHz source/modulator with -6.5 dBm output power[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015,5(3):412-418. DOI:10.1109/TTHZ.2015.2411053.

[14] TOUSI Y,AFSHARI 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. DOI:10.1109/JSSC.2014.2375324.

[15] DENG Xiaodong, LI Yihu, LI Jiankang, et al. A 320 GHz 1×4 fully integrated phased array transmitter using 0.13 μm SiGe BiCMOS technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(6): 930-940. DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2477604.

[16] JALILI H, MOMENI O. 17.10 A 318-to-370 GHz standing-wave 2D phased array in 0.13 μm BiCMOS[C]// 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). San Francisco,CA,USA:IEEE, 2017:310-311. DOI:10.1109/ISSCC.2017.7870385.

[17] AHMED A, LI L J, JUNG M, et al. A 140 GHz scalable on-grid 8×8-element transmit-receive phased-array with up/down converters and 64QAM/24 Gbps data rates[C]// 2023 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium(RFIC). San Diego, CA,USA:IEEE, 2023:93-96. DOI:10.1109/RFIC54547.2023.10186155.

[18] ZHANG Jicong, DAI Bingli, MENG Xiangao, et al. 24.2 a scalable 134-to-141GHz 16-element CMOS 2D $\lambda/2$-spaced phased array[C]// 2024 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). San Francisco,CA, USA:IEEE, 2024:414-416. DOI: 10.1109/ISSCC49657.2024.10454376.

[19] ZHAO Yuncheng, WANG Lan, ZHANG Yaxin, et al. High-speed efficient terahertz modulation based on tunable collective-individual state conversion within an active 3 nm two-dimensional electron gas metasurface[J]. Nano Letters, 2019, 19(11): 7588-7597. DOI:10.1021/acs.nanolett.9b01273.

[20] DEVI K M, JANA A, PUNJAL A, et al. Polarization-independent tunable terahertz slow light with electromagnetically induced transparency metasurface[J]. New Journal of Physics, 2022,24(9):093004. DOI:10.1088/1367-2630/ac8ac4.

[21] JI Yunyun,FAN Fei,ZHANG Xin,et al. Active terahertz anisotropy and dispersion engineering based on dual-frequency liquid crystal and dielectric metasurface[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(15): 4030-4036. DOI: 10.1109/JLT. 2020. 2985667.

[22] LYNCH J J,HERRAULT F,KONA K,et al. Coded aperture subreflector array for high resolution radar imaging[C]// Proceedings Volume 10994, Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XXII. Baltimore, MD, United States: SPIE, 2017: 124-133. DOI: 10.1117/12.2525061.

[23] KOMAR A, PANIAGUA-DOMÍNGUEZ R, MIROSHNICHENKO A, et al. Dynamic beam switching by liquid crystal tunable dielectric metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2018,5(5):1742-1748. DOI:10.1021/acsphotonics.7b01343.

[24] SU Xiaoqiang, OUYANG Chunmei, XU Ningning, et al. Active metasurface terahertz deflector with phase discontinuities[J]. Optics Express, 2015,23(21):27152-27158. DOI:10.1364/OE.23.027152.

[25] TAMAGNONE M,CAPDEVILA S,LOMBARDO A,et al. Graphene reflectarray metasurface for terahertz beam steering and phase

modulation[J/OL]. ArXiv:1806.02202, 2018. DOI:10.48550/arXiv.1806.02202.

[26] SHU M J,CHATZAKIS I,KUO Y,et al. Ultrafast sub-threshold photo-induced response in crystalline and amorphous GeSbTe thin films[J]. Applied Physics Letters, 2013,102(20):201903. DOI:10.1063/1.4807731.

[27] LIU Shuo,CUI Tiejun. Concepts,working principles,and applications of coding and programmable metamaterials[J]. Advanced Optical Materials, 2017,5(22):1700624. DOI:10.1002/adom.201700624.

[28] 周天驰,陈蓝,吴虹汝,等. 太赫兹动态超表面[J]. 电子学报, 2023,51(10):2635-2650. (ZHOU Tianchi,CHEN Lan,WU Hongru, et al. Terahertz active metasurfaces[J]. Acta Electronica Sinica, 2023,51(10):2635-2650.) DOI:10.12263/DZXB.20221351.

[29] ZHANG Lei,CHEN Xiaoqing,LIU Shuo,et al. Space-time-coding digital metasurfaces[J]. Nature Communications, 2018,9(1): 4334. DOI:10.1038/s41467-018-06802-0.

[30] JOHNSON J M,RAHMAT-SAMII Y. Genetic algorithm optimization for aerospace electromagnetic design and analysis[C]// 1996 IEEE Aerospace Applications Conference. Aspen,CO,USA:IEEE, 1996:87-102. DOI:10.1109/AERO.1996.495874.

[31] ROBINSON J,RAHMAT-SAMII Y. Particle swarm optimization in electromagnetics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004,52(2):397-407. DOI:10.1109/TAP.2004.823969.

[32] SHAN Tao,PAN Xiaotian,LI Maokun,et al. Coding programmable metasurfaces based on deep learning techniques[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2020,10(1):114-125. DOI:10.1109/JETCAS.2020.2972764.

[33] ZHANG Zhang,YAN Xin,LIANG Lanju,et al. The novel hybrid metal-graphene metasurfaces for broadband focusing and beam-steering in farfield at the terahertz frequencies[J]. Carbon, 2018(132):529-538. DOI:10.1016/j.carbon.2018.02.095.

[34] KIM T T,KIM H,KENNEY M,et al. Amplitude modulation of anomalously refracted terahertz waves with Gated-Graphene metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2018,6(1):1700507. DOI:10.1002/adom.201700507.

[35] VENKATESH S,LU X Y,SAEIDI H,et al. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips[J]. Nature Electronics, 2020,3(12):785-793. DOI:10.1038/s41928-020-00497-2.

[36] LIU Shui,XU Feng,ZHAN Junlin,et al. Terahertz liquid crystal programmable metasurface based on resonance switching[J]. Optics Letters, 2022,47(7):1891-1894. DOI:10.1364/OL.452347.

[37] FU Xiaojian,YANG Fei,LIU Chenxi,et al. Terahertz beam steering technologies:from phased arrays to field-programmable metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2020,8(3):1900628. DOI:10.1002/adom.201900628.

[38] HEADLAND D,NIU T M,CARRASCO E,et al. Terahertz reflectarrays and nonuniform metasurfaces[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017,23(4):1-18. DOI:10.1109/JSTQE.2016.2640452.

[39] HILLS R E. The james clerk Maxwell telescope(United Kingdom/Netherlands 15-metre antenna) [C]// European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings. Sweden:NASA, 1985:63-70.

[40] DENG Ruyuan,YANG Fan,XU Shenheng,et al. Terahertz reflectarray antennas:an overview of the state-of-the-art technology[C]// 2014 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications(ICEAA). Palm Beach,Aruba:IEEE, 2014:667-670. DOI:10.1109/ICEAA.2014.6903941.

[41] NIU T M,WITHAYACHUMNANKUL W,UNG B S Y,et al. Experimental demonstration of reflectarray antennas at terahertz frequencies[J]. Optics Express, 2013,21(3):2875-2889. DOI:10.1364/OE.21.002875.

[42] 葛忆,夏天雨,杨军,等. 太赫兹液晶反射阵列移相单元的设计与分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(2):187-191. (GE Yi,XIA Tianyu,YANG Jun,et al. Design and analysis of liquid crystal-based reflectarray phase shifting cells in THz band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):187-191.) DOI:10.11805/TKYDA201702.0187.

[43] QU Shiwei,XIAO Lin,YI Huan,et al. Frequency-controlled 2-D focus-scanning terahertz reflectarrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019,67(3):1573-1581. DOI:10.1109/TAP.2018.2888949.

[44] WU G B,CHAN K F,SHUM K M,et al. Millimeter-wave and terahertz OAM discrete-lens antennas for 5G and beyond[J]. IEEE Communications Magazine, 2022,60(1):34-39.

[45] WU G B,CHAN K F,QU S W,et al. A 2-D beam-scanning Bessel launcher for terahertz applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(8):5893-5903. DOI:10.1109/TAP.2020.2988936.

[46] WU G B,ZENG Y S,CHAN K F,et al. High-gain circularly polarized lens antenna for terahertz applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019,18(5):921-925. DOI:10.1109/LAWP.2019.2905872.

[47] ZHU J F,YANG Y,MCGLOIN D,et al. Sub-terahertz 3-D printed all-dielectric low-cost low-profile lens-integrated polarization beam splitter[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021,11(4):433-442. DOI:10.1109/TTHZ.2021.3064209.

[48] KUNDTZ N,SMITH D R. Extreme-angle broadband metamaterial lens[J]. Nature Materials, 2010(9):129-132.

[49] GRZYB J,ANDREE M,JAIN R,et al. A lens-coupled on-chip antenna for dual-polarization SiGe HBT THz direct detector[J].

IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019,18(11):2404-2408. DOI:10.1109/LAWP.2019.2927300.

[50] WU G B,ZENG Y S,CHAN K F,et al. 3-D printed 3-D near-field focus-scanning lens for terahertz applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022,70(11):10007-10016. DOI:10.1109/TAP.2022.3209174.

[51] YI Xiang, WANG Cheng, CHEN Xibi, 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, 2021,56(2):327-339. DOI:10.1109/JSSC.2020.3020291.

[52] ANDY A S, HAO Y. Flat Luneburg lens at 0.24 THz for antenna beam steering applications[C]// 2019 the 13th European Conference on Antenna and Propagation. Krakow,Poland:IEEE, 2019:1-4.

[53] SAEIDI H,VENKATESH S,LU X Y,et al. THz prism:one-shot simultaneous localization of multiple wireless nodes with leaky-wave THz antennas and transceivers in CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2021,56(12):3840-3854. DOI:10.1109/JSSC.2021.3115407.

[54] AMARASINGHE Y, MENDIS R, SHRESTHA R, et al. Broadband wide-angle terahertz antenna based on the application of transformation optics to a Luneburg lens[J]. Scientific Reports, 2021,11(1):5230. DOI:10.1038/s41598-021-84849-8.

[55] LU H D,ZHU S Y,SKAIK T,et al. Sub-terahertz metallic multibeam antenna based on a sliding aperture technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024,72(1):290-299. DOI:10.1109/TAP.2023.3323894.

作者简介：

杨光耀(1994-)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为射频前端与天线系统.email:y85571958@163.com.

宋瑞良(1980-)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为太赫兹源与通信系统.

张乃柏(1983-)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为半导体器件与射频前端.

邓　琨(1992-)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为射频前端与天线系统.

李依桐(1992-)，女，博士，高级工程师，主要研究方向为太赫兹与光学系统.

王　莹(1994-)，女，博士，主要研究方向为太赫兹神经网络应用.