

文章编号: 2095-4980(2024)12-1339-17

太赫兹肖特基二极管与变频器件的研究进展

薛欣童^{1,2}, 李战峰², 张海涛², 郝晓林³, 梁士雄^{1,3}(1.天津大学 微电子学院, 天津 300072; 2.太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;
3.中国电子科技集团公司 第十三研究所, 河北 石家庄 050011)

摘要: 太赫兹波在电磁波谱中处于独特位置, 具有高频率、高带宽和高穿透性等特点, 在通信、雷达、成像、传感、安检等领域具有广泛的应用前景。倍频器和混频器等变频器件是固态太赫兹系统的关键组成部分。肖特基二极管具有寄生参数低, 工艺简单, 易于集成等优点, 其工作频率已覆盖了整个太赫兹频段。基于肖特基二极管变频器件具有室温工作、频带宽、电子可调性、相位噪声低和灵敏度高等特点, 已成为太赫兹收发链路的主流器件。本文综述了近年来肖特基二极管技术的发展, 包括其结构和制备方法。此外, 还介绍了基于肖特基二极管的倍频器和混频器现状, 并对未来的发展趋势进行了探讨。

关键词: 肖特基二极管; 化合物半导体; 倍频器; 混频器; 太赫兹; 单片集成电路

中图分类号: TN771

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024264

Research progress of terahertz Schottky diodes and frequency conversion devices

XUE Xintong^{1,2}, LI Zhanfeng², ZHANG Haitao², HAO Xiaolin³, LIANG Shixiong^{1,3}(1.School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2.Key Laboratory of New Sensing and Intelligent Control of
Taiyuan University of Technology, Ministry of Education, Taiyuan Shanxi 030024, China; 3.The 13th Research Institute of
China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050011, China)

Abstract: Terahertz waves occupy a unique position in the electromagnetic spectrum, characterized by high frequency, high bandwidth, and high penetration, which hold broad application prospects in fields such as communication, radar, imaging, sensing, and security inspection. Frequency converters like frequency multipliers and mixers are key components of solid-state terahertz systems. Schottky diodes boast low parasitic parameters, simple fabrication processes, and ease of integration, with their operating frequencies covering the entire terahertz band. Frequency conversion devices based on Schottky diodes, featuring room-temperature operation, broad bandwidth, electronic tunability, low phase noise, and high sensitivity, have become the mainstream devices in terahertz transceiver links. This article reviews the recent developments in Schottky diode technology, including its structure and fabrication methods. Additionally, it introduces the current state of frequency multipliers and mixers based on Schottky diodes and discusses future development trends.

Keywords: Schottky diode; compound semiconductor; frequency multiplier; mixer; terahertz; monolithic integrated circuit

太赫兹波位于微波与红外之间, 具有带宽大、频率高、分辨率高和波长短等特点, 在高速无线通信^[1]、高分辨力探测成像和无损检测等方面^[2-4]具有巨大的应用潜力。过去的几十年里, 空间探索、天文科学、地球科学等领域对太赫兹技术的需求越来越大, 推动了太赫兹源、太赫兹探测和太赫兹系统的发展。2012年, 频率范围为0.3~0.95 THz、空间分辨力为0.01的阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵列(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA)实现了对宇宙暗物质的观测。2018年, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发射了深空探测卫星罗塞塔(Rosetta), 利用562 GHz光谱探测器^[5]追踪挥发性物质的数量及其逃逸速度。2022年, 美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)在纽约罗马成功进行了飞行试验, 证明了300 GHz以上无线电通信的可行性。

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-08-21

目前, 基于光子学和电子学的两种方法是产生和接收太赫兹的主要手段^[6]。光子学方法主要有: 太赫兹气体激光器、空气等离子体太赫兹源、光电导天线、非线性光学效应的光学整流、光学差频、参量振荡等方法^[7], 能够覆盖较宽的频带, 并提供较高的输出功率, 但通常依赖复杂的光学系统, 成本较高。电子学方法主要有真空电子学和固态电子学, 真空电子学主要有行波管、速调管、太赫兹回旋加速器等电真空器件^[5], 可产生脉冲功率高达千瓦级的太赫兹波^[8]。近年来, 随着半导体材料和工艺的快速发展, 利用半导体器件产生太赫兹波^[9]已成为主流趋势。半导体器件主要包括肖特基势垒二极管 (Schottky Barrier Diode, SBD)、异质结势垒变容管 (Heterostructure Barrier Varactor, HBV) 和高电子迁移率晶体管 (High Electron Mobility Transistor, HEMT)^[10-12]; HBV 是一个对称装置, 只产生奇次谐波, 不需要直流偏置, 常用作高功率奇次倍频器, 对工艺有一定的要求。HEMT 通常作为三端口器件用于信号放大, 基于 HEMT 的功率放大器和低噪声放大器工作频率已达到 1 THz。肖特基二极管具有截止频率高, 结构简单等优点, 是最早发展起来的固态器件, 也是目前最成熟的太赫兹变频器件之一。目前国际上成熟的倍频器以及混频器工作频率已覆盖 0.1~3 THz^[13-15], 基于太赫兹肖特基二极管变频器件可以实现在室温下工作, 具有宽频带、电子可调性、低相位噪声、高灵敏度和超高光谱分辨力等特性^[16-18], 在太赫兹高速无线通信、雷达和精确制导等领域开展了广泛的应用验证。

本文综述了基于太赫兹肖特基二极管的太赫兹变频器件, 并介绍了倍频器和混频器的工作机理和特性。最后, 对基于太赫兹肖特基二极管的变频器件的未来研究方向进行了展望。

1 太赫兹肖特基二极管技术

早在 1874 年, K F Braun 就开始对金属-半导体接触进行研究。1937 年, 沃尔特·H·肖特基证明了肖特基二极管内建立电位的变化仅取决于半导体中的自由电荷^[19]。1904 年, 肖特基二极管首次成功用于无线电探测^[20], 频率达到 60 GHz。目前, 用于太赫兹频率的肖特基二极管主要采用砷化镓 (GaAs) 或氮化镓 (GaN) 材料, 并生长出不同掺杂浓度的外延层。

1.1 肖特基二极管器件结构

肖特基势垒二极管是根据金属-半导体接触的特性制成的。以 GaAs 肖特基二极管为例, 其内部电路结构^[21]如图 1 所示。其衬底材料为 GaAs, 然后生长高掺杂浓度 GaAs 的 n^+ 外延层以及低掺杂浓度 GaAs 的 n^- 外延层。 n^+ 外延层与金属之间形成阴极欧姆接触, n^- 外延层与金属之间形成阳极肖特基接触。肖特基二极管的 n^+ 掺杂浓度较高, 阴极欧姆接触电阻较低; 阳极一般用钛或镍制成。与 PN 结二极管相比, 肖特基二极管具有以下特点: a) 正向压降以及反向耐压较低。肖特基二极管有更低的势垒高度, 正向压降较低; 另外, 其反向势垒低, 反向耐压也相对较低, 在高频和低压电路中能够起到整流功能。b) 反向恢复时间短。肖特基二极管以多数载流子进行工作, 其反向恢复时间主要取决于势垒电容的充放电过程。因此, 肖特基二极管的开关速度较快, 插入损耗较小, 可工作在太赫兹频段。

早期的肖特基二极管寄生参数大, 工作频率难以提升。随后出现的触须式肖特基二极管结构, 如图 2(a) 所示, 寄生参数小, 可工作在太赫兹频段, 但触须式肖特基二极管结构存在可重复性差、易碎、难以实现平面集成等缺点, 阻碍了其工作频率进一步提高。随着半导体加工工艺的不断进步, 平面加工工艺逐渐成熟, 肖特基二极管也朝着平面集成的方向不断发展。1987 年, 美国弗吉尼亚大学^[22]发明了平面肖特基二极管, 很大程度上增强了肖特基二极管器件性能的一致性以及结构的稳定性, 虽然其寄生参数仍较大, 但其所提出的平面结构为现代平面肖特基二极管奠定了基础。目前, 平面肖特基二极管主要包括准垂直平面肖特基二极管和表面通道平面肖特基二极管。准垂直平面肖特基二极管的研究工作最早由德国达姆施塔特工业大学完成, 采用晶体管平面电路集成技术, 同时保留了与触须式肖特基二极管制造工艺相同的“蜂窝状”操作, 如图 2(b) 所示。由于存在较大的寄生电容, 其在太赫兹上的应用受到限制。目前最成熟的平面二极管技术是由美国喷气推进实验室与美国弗吉尼亚大学共同实现的, 称为表面沟道平面肖特基二极管^[23]。其物理结构如图 2(c) 所示, 通过在衬底上蚀刻表面通道减小二极管与衬底之间的互连电容, 该结构引入的寄生电容明显低于准垂直平面肖特基二极管, 其高频性能极大提高, 广泛用于太赫兹器件。

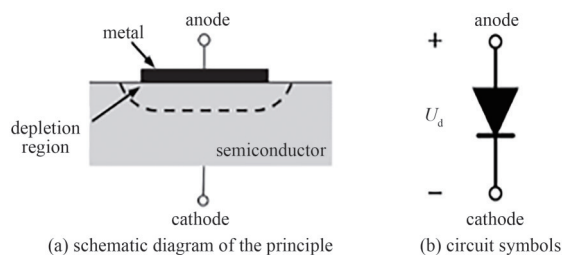


Fig.1 Schematic diagram and circuit symbols of a Schottky diode
图 1 肖特基二极管原理示意图和电路符号

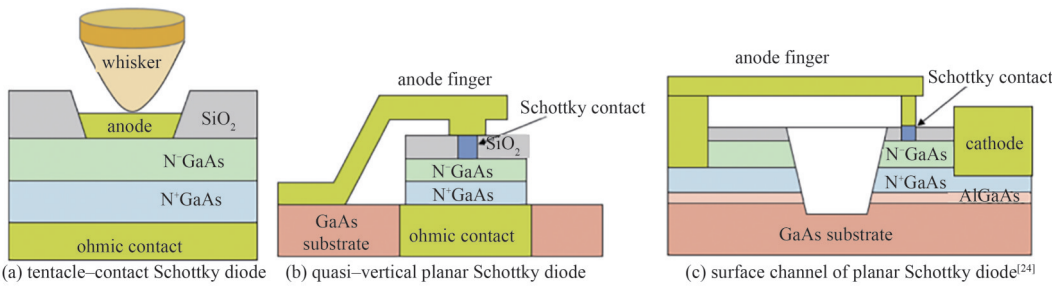


Fig.2 Types of Schottky diodes
图2 肖特基二极管的类型

1.2 肖特基二极管材料结构

肖特基二极管典型的材料结构如图 3 所示，从下到上依次为衬底、缓冲层、高掺杂浓度外延层(n⁺)和低掺杂浓度外延层(n⁻)。衬底是肖特基二极管结构的最下层，通常由厚度较大的半导体材料制成，如硅、砷化镓或蓝宝石。缓冲层位于衬底与外延层之间，其作用是缓解由于外延层和衬底之间材料晶格差异引起的应力和位错密度，通常由一种或多种材料组成。其厚度和成分经过精心设计，以逐渐过渡材料的晶格常数和热膨胀系数。外延层位于最上层，是一个经过精确控制的半导体薄层，通常由硅、砷化镓或氮化镓制成，这一层的厚度、掺杂浓度和材料特性对于二极管的性能至关重要。

衬底和缓冲层都是半绝缘的，n⁺层主要目的是形成欧姆接触，一般采用分子束外延生长而成，掺杂浓度通常为 10¹⁸ cm⁻³ 数量级，厚度为微米量级。在工艺条件允许的情况下，掺杂浓度和厚度尽可能大，以保证欧姆接触电阻小。n⁻层是形成肖特基接触的关键半导体层，一般采用分子束外延或金属有机气相外延生长而成。其掺杂浓度和厚度是影响器件特性的关键参数，厚度一般小于微米；对于太赫兹频段，掺杂浓度为 10¹⁷ cm⁻³ 数量级^[25]。最佳掺杂浓度与材料特性相关，当掺杂浓度升高时，二极管的电阻将减小，结电容增大，正向特性得到改善，同时会导致隧穿电流增大，恶化其反向特性。二极管的工作频率越高，对应的掺杂浓度也越高。

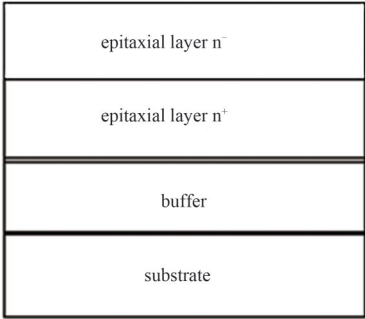


Fig.3 Internal material structure of a Schottky diode
图3 肖特基二极管内部材料结构

1.3 肖特基二极管发展动态

国外肖特基二极管的研究已经成熟，以美国 VDI(Virginia Diodes Inc)、德国 ACST(Advanced Components for Signal Transmission)和英国卢瑟福实验室为代表，已研制出系列二极管产品，并对国内禁运。国内对太赫兹砷化镓肖特基二极管的研究起步较晚，2012 年之前相关器件制造技术和成果报道较少。2012 年，中电科产业基础研究院研制出全国产化的砷化镓肖特基二极管^[26]，并提供了精确的三维模型。2013 年，中电科产业基础研究院邢东等报道了一种砷化镓肖特基二极管制造技术，通过类似于空气桥构造准确接触阳极^[27]。基于该技术，二极管的寄生电容大大降低到小于 5 fF，总电容通常为 7~8 fF。2015 年，中国工程物理研究院李倩等报道了一种接触面直径为 1 μm 的平面肖特基二极管^[28]，二极管的截止频率达到 8.7 THz，结电容为 1.76 fF。经过多年的发展，目前国内砷化镓肖特基二极管的截止频率已接近 20 THz，与国外先进水平相当。

由于砷化镓材料带隙较窄，输出功率较低，对高功率的耐受能力有限，热导率较低，导致其在高温和高功率条件下表现不佳；而氮化镓材料带隙很宽，合金的禁带宽度可调区间大，电子饱和速率高，热导率高，非常适合制备高频高功率的电子器件，因此国际上开始对氮化镓肖特基二极管进行研究。2015 年，中电科产业基础研究院梁士雄等^[29]报道了一种基于同质外延 n 型 GaN 材料的肖特基二极管，采用空气桥结构和衬底减薄技术降低寄生参数，并通过该方法将截止频率提高到零偏下的 1.2 THz 以上。2022 年，中电科产业基础研究院基于空气桥和同质外延工艺研制的肖特基二极管^[30]截止频率提高到 1.61 THz，击穿电压提高到 16.17 V，很大程度上带动了国内太赫兹技术的发展。此外，为使平面 GaN 肖特基二极管具有更好的性能，导热金刚石衬底技术、衬底转移技术和无衬底技术极大促进了平面肖特基二极管的发展。2021 年，法国里尔大学在蓝宝石异质外延 GaN 上制造了肖特基二极管^[31]，退火前测得 10 μA 下的击穿电压为 22.4 V，退火后为 36 V；并且串联电阻非常低，仅有

1~6 Ω 。2023 年, 法国里尔大学在 SiC 衬底的 n 型 GaN 上制造了准垂直氮化镓肖特基二极管^[32], 未经处理的二极管在 1 μA 下获得的击穿电压为 19.3 V, 经过氢氧化钾处理后击穿电压提高至 27.5 V。图 4 为肖特基二极管结构图。

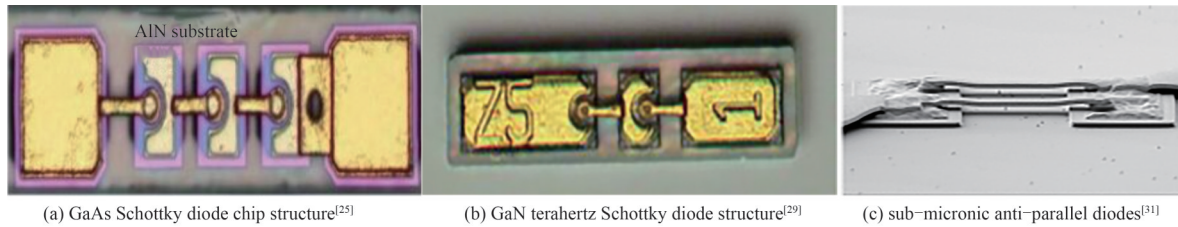


Fig.4 Schottky diode structures
图 4 肖特基二极管结构

2 太赫兹倍频技术

倍频器是一种电子电路或装置, 用于将输入信号的频率提高到其整数倍。倍频器广泛用于通信系统、雷达、信号处理等领域, 尤其在高频信号的应用中非常重要。

2.1 倍频器工作原理

倍频技术的核心在于非线性器件的变频效应, 这些非线性元件可以是二极管、晶体管或其他能够引入非线性失真的元件。目前太赫兹倍频器大多基于肖特基二极管, 其非线性特征来源于肖特基接触。非线性失真会产生输入信号频率的各次谐波, 通过选择合适的滤波网络以及相应的匹配网络提取出所需谐波(如二次谐波)并放大, 即可实现频率倍增, 其工作原理如图 5 所示。在产生高频信号时, 通常不会直接采用低频信号源通过一个高次倍频器实现, 因为单个高次倍频器的效率低于多个低次倍频器组合的效率, 一般将高次倍频拆分为多个低次倍频的组合。随着半导体的发展, 对平面肖特基二极管倍频电路提出了更高要求, 越来越多的电路被开发并用于实际的太赫兹半导体器件中。

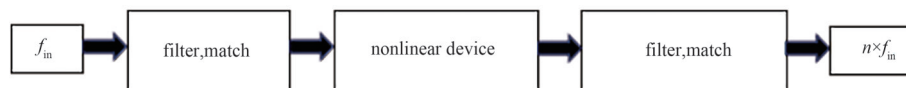


Fig.5 Schematic diagram of terahertz frequency multiplier principle
图 5 太赫兹倍频器原理示意图

介绍常用的二倍频器和三倍频器电路结构。二倍频电路主要包括平衡式和非平衡式 2 种结构, 简化后的电路如图 6(a)~(b)所示。平衡式二倍频器中, 二极管采用反向串联结构, 输入信号以平衡方式加载到反向串联的二极管上(如矩形波导的 TE_{10} 模式), 而输出则以非平衡方式呈现(如微带线或悬空微带线的准横向电场和磁场(Transverse Electric and Magnetic Field, TEM)模式), 输入和输出信号之间的隔离有助于设计和优化匹配电路; 此外, 输入信号的平衡分布和输出信号的非平衡分布使输出信号不含输入频率的奇次谐波成分, 仅含偶次谐波成分, 这有利于提高倍频器的效率。目前所报道的太赫兹二倍频器多采用这种电路形式, 结构简单, 体积小。非平衡式二倍频器的二极管方向与平衡倍频器的方向相同, 不同的是, 经过非线性变换后, 输出电路中产生的奇次谐波分量不会相互抵消, 由于二极管输入输出端是隔离的, 需要设计合理的匹配电路。输入输出滤波器需要最大程度地提取二次谐波分量, 抑制其他谐波分量, 这种非平衡结构在太赫兹二倍频器中使用得相对较少。

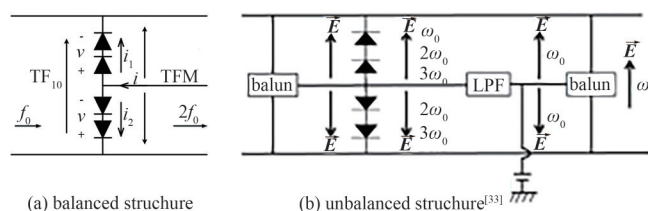


Fig.6 Common circuit structures of terahertz frequency multipliers
图 6 太赫兹倍频器的常用电路结构

三倍频电路主要由非平衡电路结构组成，包括反向并联二极管对和并联二极管对 2 种形式。如图 7(a)所示，反向并联的二极管对与输入信号反向并联，偶数次谐波在该结构中形成虚拟环路，只有奇次谐波进入输出端，实现了对偶次谐波的抑制，适用于奇倍频器。太赫兹三倍频器的另一种形式是并联二极管对，其中输入输出信号和直流偏置都是从二极管对的中心加载的，这种电路形式无法抑制谐波分量。与反向并联二极管相比，这种类型的太赫兹三倍频器直流和射频(Radio Frequency, RF)接地端具有相同的电位，且没有接地电容，如图 7(b)所示。目前报道的太赫兹三倍频器多采用这种形式，偏置电路的负载相对灵活，总体上对加工和组装的要求也相对较低。

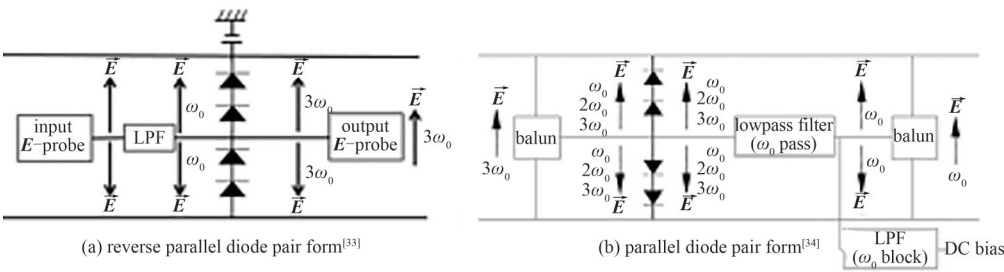


Fig.7 Unbalanced tripler structure with reverse parallel diode pair form
图7 非平衡三倍频器结构

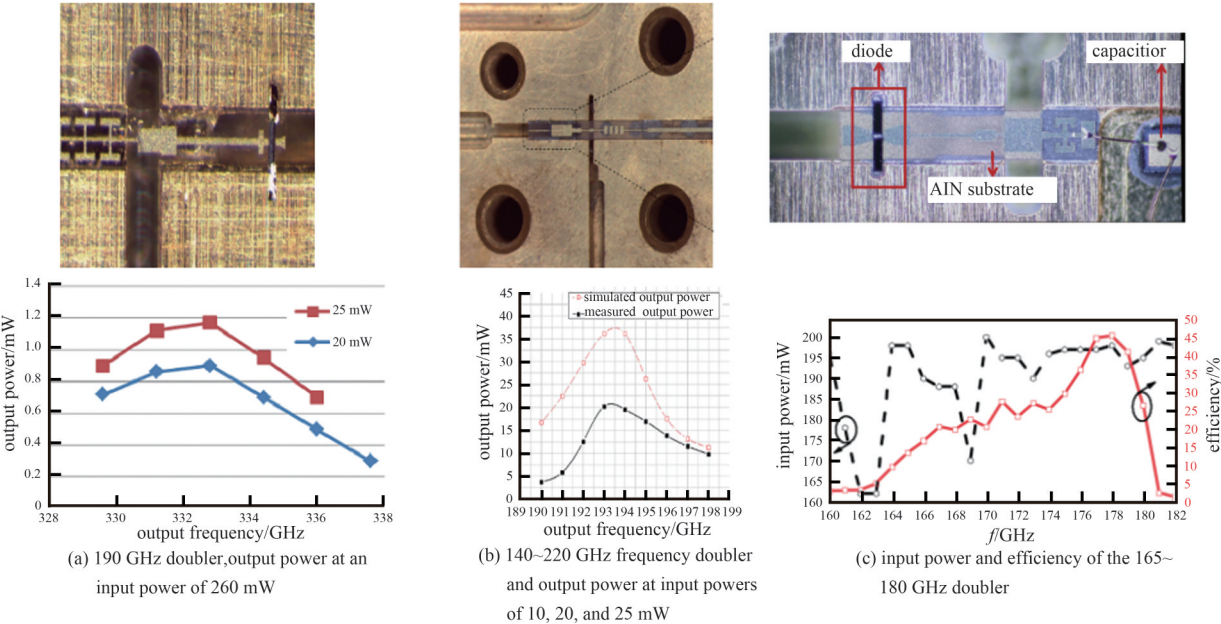


Fig.8 Chip photos and test curves of terahertz flip-chip doublers
图8 太赫兹倒装二频器的芯片照片和测试曲线

2.2 基于倒装芯片的倍频器

传统的太赫兹固态器件是带有分立二极管的混合集成电路形式，通过使用导电胶粘剂，以“倒装”的方式组装在电路的微带上。混合集成电路中导电胶所引入的寄生参量比较大，但由于其工艺简单、成本低、易于组装等优点，一般用于低频段太赫兹固态电路。二倍频和三倍频是太赫兹肖特基二极管倍频器中常见的形式。

2.2.1 平衡二倍频器

太赫兹平衡二倍频器的设计简单，尤其是在实现输入和输出阻抗匹配时，大大简化了整个器件设计的复杂性。在倍频器的性能方面，由于采用了平衡的设计架构，倍频器产生的杂散谐波输出非常低，因此不需要额外的滤波器滤除这些杂散谐波。从实现倍频的半导体器件非线性特性看，倍频器的转换效率与所利用的谐波数量直接相关，谐波数量越多，倍频器的效率越低。与高次谐波频率倍频器相比，二倍频器的效率最高，并且容易覆盖超过 30% 的带宽。

2013 年，电子科技集团第 55 所姚常飞等^[35]报道了一种 190~225 GHz 频段的高效倍频器，该电路采用了基于石英衬底的倒装芯片技术，为器件提供了良好的散热路径、可靠的直流电(Direct Current, DC)和射频接地。其试验

结果表明,当输入功率大于 80 mW 时,输出功率大于 5 mW,转换效率大于 6%。2016 年,电子科技大学陈哲等^[36]报道了一种 190 GHz 倍频器,如图 8(a)所示,在电路结构中,将 6 个二极管反向串联排列,二极管两端的电路通过金丝与腔体连接形成接地。测试结果表明,该倍频器在 193 GHz 频率下的最大输出功率为 20 mW,转换效率为 8%。2022 年,电子科技大学的吴成凯等^[37]报道了一种覆盖 140~220 GHz 范围的全频段平衡二倍频器,采用了一种新型的同轴波导到微带线转换器,如图 8(b)所示。该二倍频器消除了输出电路的介电损耗和转换损耗,并扩展了带宽。在 10~20 mW 的输入功率下,整个 140~220 GHz 频段的转换效率为 6.8%~11.6%。2023 年,中国科学院国家空间科学中心报道了一种基于平面肖特基二极管的高效率、高功率 165~180 GHz 平衡二倍频器^[38],如图 8(c)所示,采用了带内嵌入阻抗优化方法。该二倍频器在 160~200 mW 输入功率下,165~180 GHz 频段的转换效率为 13%~46%;当输入功率为 198 mW 时,在 178 GHz 处测得的峰值输出功率为 90.88 mW,转换效率为 46%。

2.2.2 非平衡三倍频器

太赫兹三倍频器相对更难构建,需要在输入和输出端添加滤波器,以有效隔离不需要的频率分量。输入输出阻抗匹配电路一般在微电路上同时实现,它们之间的相互作用增加了整个器件设计的复杂性。为抑制偶次谐波,需要调整整个电路结构。与二倍频器相比,三倍频器的转换效率明显较低,但获得了更高频率的三次谐波输出。

2007 年, D W Porterfield 等^[34]报道了 220 GHz 和 440 GHz 三倍频器,如图 9(a)所示。基波信号从输入波导中的 E 面探头耦合到悬浮微带线,并在 TEM 模式下向内传播。输入电路和直流偏置电路都有由高阻抗线和低阻抗线组成的低通滤波器,通过调整匹配电路,反射的二次谐波可被重复利用,这种简单的结构对太赫兹三倍频器的设计具有指导意义。结果表明,输出功率分别为 23 mW 和 13 mW 时,转换效率分别为 16% 和 12%。2015 年,英国卢瑟福·阿普尔顿实验室(Rutherford Appleton Laboratory, RAL)的 H Wang 等^[39]报道了一种用于气象多普勒雷达系统的 280 GHz 倍频器。该三倍频器电路由 6 个肖特基二极管翻转到氮化铝(AlN)基板上组成。当输入功率为 100 mW 时,240~290 GHz 频段的转换效率在 1%~5% 之间;当输入功率提高至 300 mW 时,276 GHz 的输出功率最大可达 15 mW。同年,南京电子器件研究所的孟瑾等^[40]报道了 225 GHz 非平衡三倍频器。在 215~228 GHz 频段,输出功率大于 5 mW;当输入功率为 240 mW 时,在 224 GHz 频率点获得的最大输出功率为 17.5 mW,最大转换效率为 7.3%。

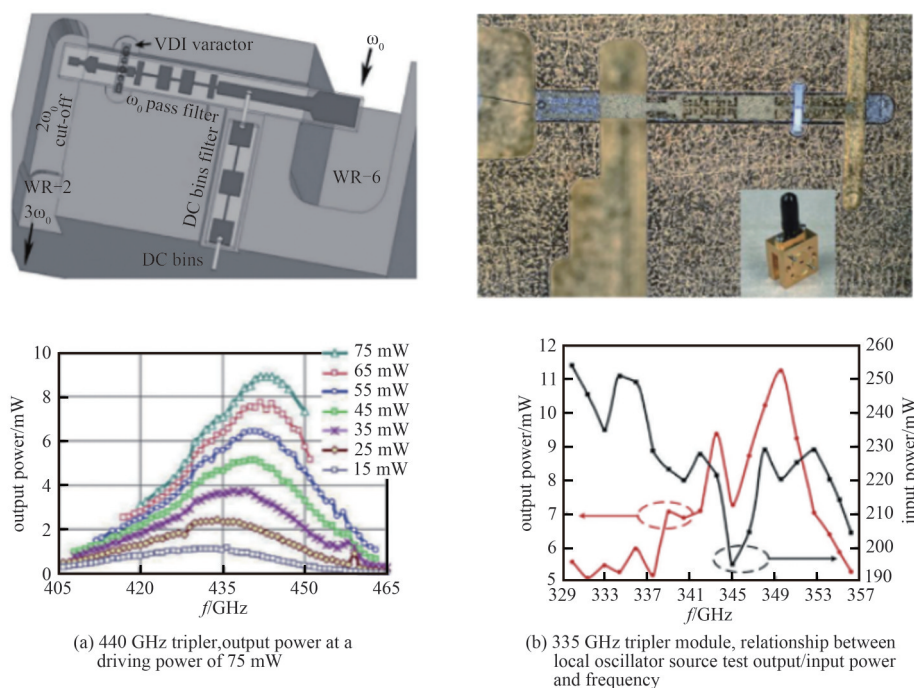


Fig.9 Terahertz flip-chip triplers and test curves

图9 太赫兹倒装三倍频器及测试曲线

2020 年,西安电子科技大学的郭成等^[41-42]报道了一种基于波导谐振器滤波器的 135~150 GHz 低损耗阻抗匹配三倍频器,通过调整滤波器腔谐振频率实现阻抗匹配。该器件为 47.5~142.5 GHz 无偏三倍频器,输出带宽为 15 GHz。当输入功率为 50.12 mW 时,三倍频器的转换效率为 3.97%~4.87%。2023 年,中国科学院国家空间科学

中心李宇航等^[43]基于混合集成方法设计了一种 335 GHz 非平衡三倍频器, 如图 9(b)所示, 采用对称锥形渐变线匹配结构。该三倍频器在 330~356 GHz 频率范围内的输出功率均大于 5 mW, 在 220 mW 的输入功率下, 349.5 GHz 时最大输出功率达到 11.2 mW, 最大转换效率约为 5.09%。

2.3 基于单片集成的砷化镓二极管倍频器

随着工作频率的增加, 太赫兹倍频器的电路尺寸越来越小, 如果手工组装电路性能会变差。此外, 混合集成电路形式受现有二极管的限制(二极管的性能可能达不到实际要求), 因此基于混合集成电路类型的太赫兹固态器件难以实现中高太赫兹频率。随着半导体工艺技术的进步, 基于衬底转移技术可将二极管转移到石英、氮化铝和金刚石等衬底上, 并在衬底上制备匹配电路; 或在砷化镓衬底上通过半导体工艺同时制备二极管和匹配电路, 实现倍频功能。这大大减少了人工组装带来的误差和电路带来的不确定性, 从而提高了太赫兹固态器件的性能, 单片集成电路的太赫兹固态器件适用于更高的频段。

2.3.1 基于衬底转移的薄膜二极管单片集成技术

目前, 太赫兹应用对高输出功率、高效率、高功率容量的太赫兹源有着巨大的需求。将肖特基二极管集成电路从砷化镓转移到损耗更小、热传导能力更强的衬底上是提高倍频器性能的有效方法。

2001 年, 美国喷气推进实验室的 E Schlecht 等提出了一种基于“无衬底”技术的 400 GHz 平衡倍频器^[44]。通过蚀刻掉衬底背面的大部分电介质, 只留下前面的框架金属导线支撑整个电路。这大大减少了电介质和导体中的能量损失, 从而提高倍频器的性能。结果表明, 在 387 GHz 下, 最大输出功率为 8 mW, 最大转换效率为 20%。2010 年, 英国 RAL 实验室的 M Henry 等采用“衬底转移技术”, 在 AlN 衬底上采用自主研发的变容二极管, 设计了输出频率为 160 GHz 的倍频器^[45], 如图 10(a)所示。以 AlN 为衬底的倍频器的转换效率是以砷化镓为衬底的 2 倍, 证明了“衬底转移技术”对倍频器性能的改进。2016 年, 德国 ACST 报告的基于衬底转移技术的 332 GHz 倍频器的最高转换效率达到 30%, 440 GHz 倍频器的最高转换效率达到 28%, 660 GHz 倍频器的最高转换效率达到 6%。图 10(b)为采用薄膜工艺制造的 440 GHz 倍频器^[46-47]。

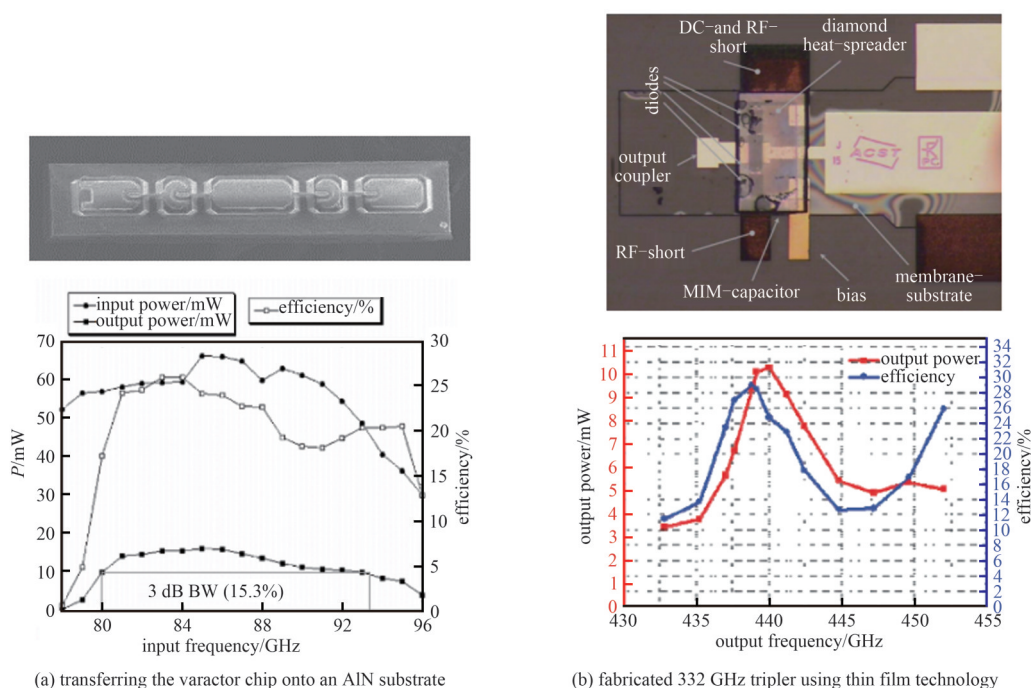


Fig.10 Substrate transfer or thin film diode technology

图 10 基板转移或薄膜二极管技术

2022 年, 中电科产业基础研究院邢东等通过将 GaAs 衬底替换为热导率更高的 AlN 衬底, 使结温大幅下降, 并基于此设计了 GaAs/AlN 异构集成太赫兹二极管, 进而研制了采用 GaAs/AlN 异构集成二极管的太赫兹倍频器。该器件由 2 只反向串联的二极管芯片组成偶次谐波平衡式倍频结构, 每只二极管芯片均采用三管串联的结构。最终结果表明, 在 162 GHz 输入功率为 316 mW 时, 耐受功率提高了约 58%, 转换效率由 21.8% 提升至 22.9%, 输出功率也相应提升至 724 mW, 证实了高热导率的 AlN 衬底可有效提升散热性能。

2.3.2 基于同一衬底的二极管单片集成技术

基于半导体工艺,在砷化镓外延片上可同时制备出二极管和匹配电路,实现倍频功能,获得二极管单片集成倍频芯片,大幅度提高了倍频芯片的一致性,减少了人工组装带来的误差,为更高频率的倍频器的发展开辟了途径。

2011年,芬兰 T Kiuru 等报道了一种基于平衡结构的 75~140 GHz 宽带三倍频单片电路^[48]。衬底厚度为 100 μm ,当输入功率为 2 mW 时,最大输出效率为 1.7%。同年,又报道了基于相同结构的 140~220 GHz 三倍频单片电路。电路的衬底厚度减小至 50 μm ,当输入功率为 5 mW 时,转换效率最高为 6.4%^[49]。2013 年,瑞典查尔姆斯理工大学的 V Drakinskiy 等报道了一种 170 GHz 单片集成倍频器^[50]。整个电路集成在厚度为 3 μm 的砷化镓上。当输出频率为 169 GHz,输出功率为 3.5 mW 时,转换效率最高可达 35%;在相对带宽为 10% 时,转换效率大于 10%。2014 年,法国航天局的 F Yang 等开发了基于单片工艺的 448 GHz 倍频器^[51],该倍频器采用了 Neal Erickson 早先提出的经典平衡结构。仿真结果表明,在 430~470 GHz 频率范围内,转换效率可达 22% 以上。2015 年, JPL 实验室报道的 105~120 GHz 倍频单片电路在 500 mW 输入功率下的最大转换效率为 30%, 170~200 GHz 倍频单片电路在相同输入功率下的最大转换效率为 25%^[52]。

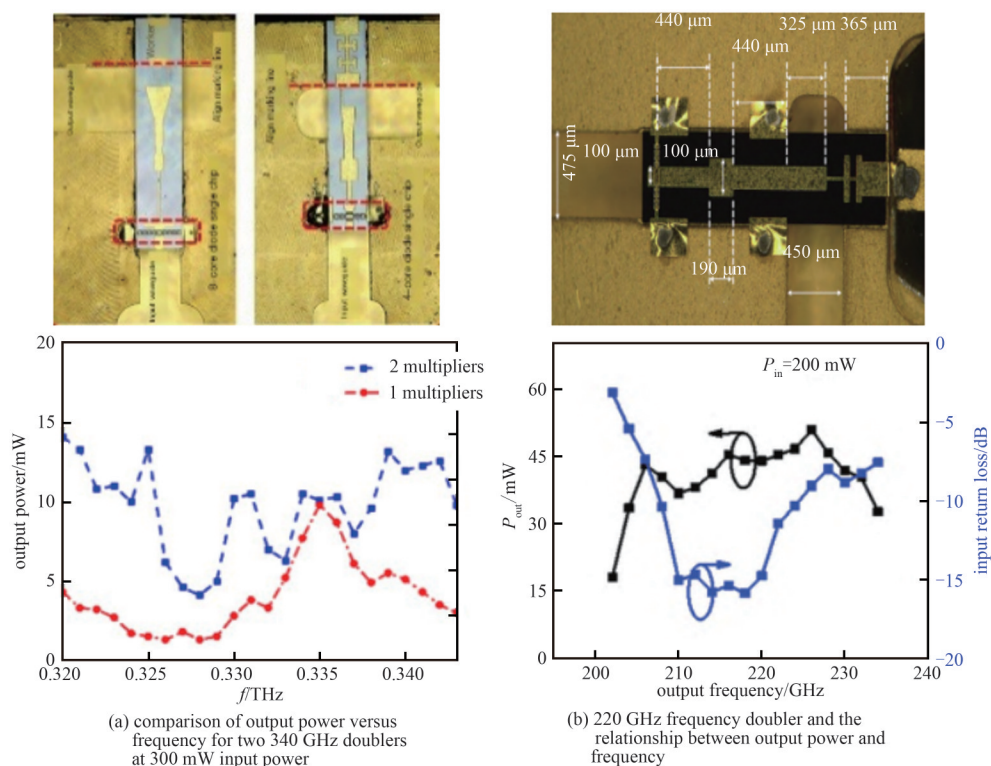


Fig.11 Terahertz monolithic integrated doubler structure and test curves

图 11 太赫兹单片集成倍频器结构及测试曲线

近年来,国内基于单片集成的倍频器的研究也取得了一些成果。2021 年,电子科技大学的寇伟等基于腔体集成化与片上集成化的太赫兹两级倍频电路研制了 340 GHz 2×2 的太赫兹倍频器^[53],如图 11(a)所示。在输入功率约 300 mW 下,334~343 GHz 频段内整体输出功率在 8 mW 以上;在 320 GHz 频点输出功率最大为 14.1 mW,转换效率达到 5%。2022 年,中国工程物理研究院何月等研制了一种基于 GaAs 的高功率 490~530 GHz 单片集成三倍频器^[54],并提出了一种新型对称平衡结构。最终结果表明,在 80~200 mW 的输入功率下,输出功率为 4~16 mW,其中峰值倍频效率为 11%;在 522 GHz 频点处,最大输出功率为 16 mW。2023 年,南京电子器件研究所的纪东峰等在厚度为 25 μm 的 GaAs 衬底上制作了 220~330 GHz 三倍频器^[55],并采用 4 个芯片串联形成反向并联平衡三倍频器结构抑制输入信号的偶次谐波。实验结果表明,在输入功率为 63 mW 时,该三倍频器在 229 GHz 处的峰值输出功率为 4.3 mW,峰值转换效率为 5.37%,并且在整个工作带宽内的输出功率均优于 2.2 mW。同年,中电科产业基础研究院徐森锋等研制了 220 GHz GaAs 单片集成二倍频器^[56],如图 11(b)所示。电路采用多阳极结构,通过结电容差异式设计提高倍频器的转换效率。测试证明,在 200 mW 的输入功率下,204~234 GHz 的频率范围内转换效率大于 15%;226 GHz 的峰值频点上,随着输入功率增大到 400 mW,倍频器可实现 90.5 mW 的最大输

出功率。

2.4 基于氮化镓肖特基二极管的大功率倍频器

早在 1928 年, Johnson 等^[57]发明了一种 III-V 化合物氮化镓材料。但由于衬底材料和 p 型掺杂等技术难题, 氮化镓材料尚未得到很好的应用^[58]。20 世纪 90 年代, 随着半导体技术的发展和掺杂技术的突破^[59], 氮化镓迎来了快速发展, 目前, 已广泛用于光电子、蓝色激光和高温高功率微波器件中^[60]。基于 GaN 材料的 W 波段功率放大器输出功率已达到瓦级^[61]。虽然 GaN 是一种直接带隙半导体, 但带隙宽度比 GaAs 大得多, GaN 基二极管也因此具有很高的本征温度, 可广泛用于大功率器件的制造中^[62]。但 GaN 的电迁移率远低于 GaAs, 使 GaN 二极管的级联阻抗更高, 器件在高频段的工作效率降低^[63]。

2016 年, 中电科产业基础研究院冯志红等通过使用 4 个阳极串联的 GaN 肖特基二极管, 在国际上首次实现了 103.5 GHz 频率下输出峰值功率为 2.1 mW 的 GaN 三倍频器^[64]。随后, 人们开始对基于 GaN 材料的大功率倍频器进行研究, 并取得了一些成果^[65-74]。2019 年, 电子科技大学张波和中国电科十三所梁士雄等^[65]报道了一种基于 GaN 平面肖特基二极管的大功率 220 GHz 三倍频器^[65-66]。为更好地散热, 二极管直接连接到金属块上。实验表明, 该三倍频器可承受 1.1 W 的最大输入功率; 在 219.5 GHz 频率下, 输出功率为 17.5 mW; 在输入功率为 900 mW 时, 最佳转换效率为 1.93%。2020 年, 中电科产业基础研究院报道了一种基于 GaN 平面肖特基二极管的 177~183 GHz 高功率倍频器^[66]。在脉冲模式 2 W 的输入功率下, 输出功率为 200~244 mW, 在 177~183 GHz 频率下转换效率为 9.5%~11.8%。

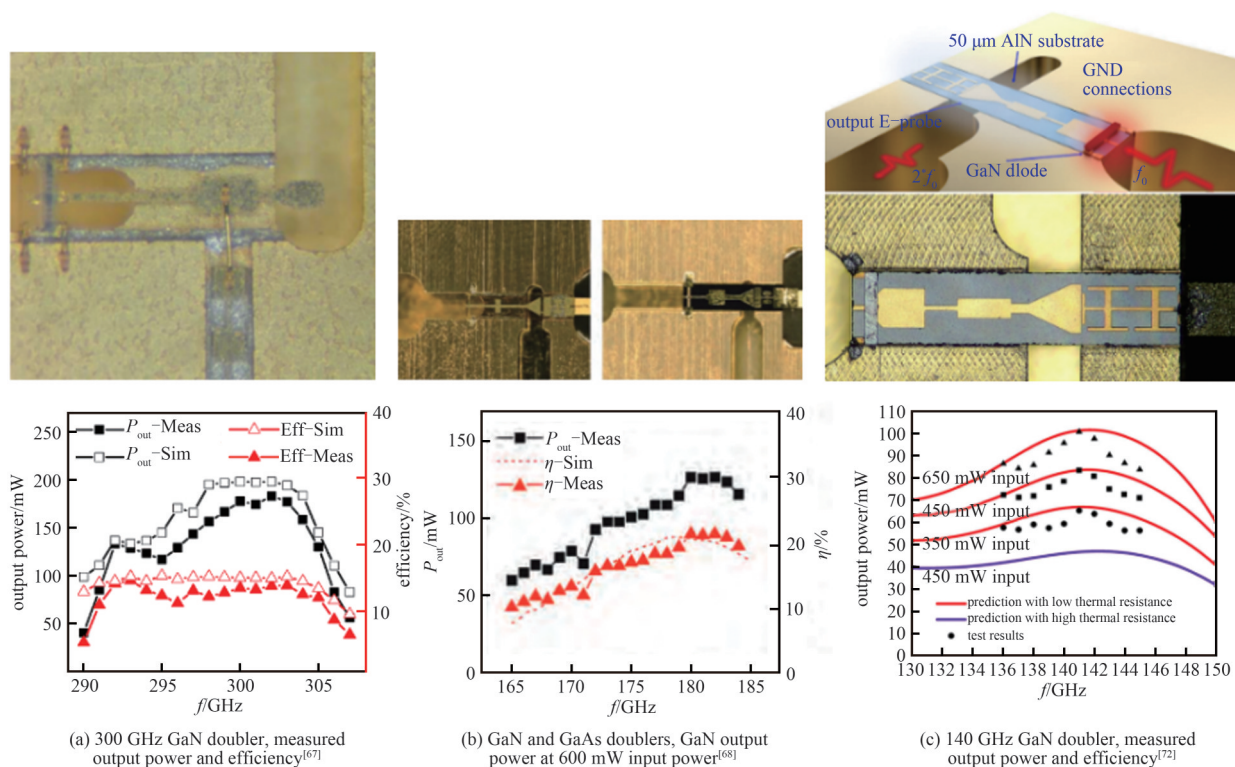


Fig.12 High-power terahertz multiplier based on GaN planar Schottky diodes

图 12 基于 GaN 平面肖特基二极管的大功率太赫兹倍频器

2022 年, 中国工程物理研究院研制了一种 D 波段单片集成的氮化镓倍频器^[69], 该倍频器基于一对反串联的四阳极平面肖特基势垒二极管。室温下的实验表明, 在连续波(Continuous Wave, CW)驱动下, 该倍频器在 115.6 GHz 时的峰值转换效率达到 17.0%; 在 109~121 GHz 的 10% 带宽内转换效率超过 4.7%, 能够承受最大 0.5 W 的 CW 输入功率。2023 年, 电子科技大学董亚洲和中国电科十三所梁士雄等^[72]针对 GaN 倍频器只能在窄脉冲和低功率输入下工作的问题, 设计了一种基于 CW 输入热阻分析的高效 GaN 倍频器, 如图 12(c)所示。使用 AlN 作为介质基板, CW 模式下, 输入功率为 646 mW 时, 输出功率达到 101.1 mW; 在输入功率为 440 mW 时, 频率转换效率在 141 GHz 达到峰值 19%。同年, 中电科产业基础研究院张立森等^[73]研制了一款 175 GHz 的单片集成 GaN 倍频器, 采用高导热 SiC 基板提高散热性。室温下, 在 164~181 GHz 内的输出功率超过 110 mW, CW 模式下的转

转换效率为 11%~20.6%；在 175 GHz 时，最大输出功率为 242 mW，转换效率为 20.2%。

2.5 基于功率合成的大功率倍频器

并联两级或多级功率合成是提高太赫兹倍频输出功率的另一种有效方法，该方法已广泛用于低太赫兹频段。当单个芯片的输出功率达到其设计或物理极限时，进一步提升输出功率的途径就非常有限。这时通过引入功率合成技术，可有效突破这一限制，将多个倍频器或放大器的输出组合，生成更强的输出信号。功率合成不仅能够显著提高输出功率，还可通过优化合成网络，减少由于器件不匹配或相位差异带来的功率损失。

2014 年，美国 JPL 实验室的 J V Siles 等^[75]推出了一种 105~120 GHz 和 550 GHz 的片上功率合成三倍频器。倍频器经输入过渡后分为 2 个通道，每个子单元电路由 6 个二极管组成。室温下，在 800 mW 的输入功率下，三倍频器在所有频段的输出功率都超过 90 mW，在 116 GHz 时达到 195 mW 的峰值功率。2017 年，VDI(弗吉尼亚二极管公司)使用基于功率合成技术的 200 GHz 单片倍频器实现了 550 mW 输出，峰值转换效率为 25%。所制成的 2.55 THz 的太赫兹源可实现 6 μ W 输出^[76]。2018 年，C Viegas 等^[77]报道了一种单片集成功率合成倍频器，该电路集成在 20 μ m 厚 GaAs 衬底上，由 4 个阳极结构组成。在 180 GHz 频率下，最高效率为 34%，最大输出功率为 109 mW；经功率合成后，该倍频器在 150~200 mW 输入功率范围内，带宽为 10%，峰值转换效率为 37%；当输入功率为 500 mW 时，倍频器输出功率为 130 mW，转换效率为 26%。

2019 年，A Maestrini 等^[78]报道了一种基于功率合成技术的 300 GHz 倍频器，每个倍频器芯片将 6 个肖特基二极管集成到 5 μ m 厚的砷化镓薄膜上。基于功率合成技术的倍频器转换效率约为 15%，在 305 GHz 时达到 17% 的峰值效率，最大输出功率为 9 mW。同年，A Maestrini^[79]开发了一种基于功率组合的 300 GHz 倍频器，如图 13(a)所示。通过单波导块和 2 个芯片实现高功率处理能力。输入功率为 20~60 mW 时，在 260~310 GHz 频段内可获得 8 mW 的输出功率和 15% 的转换效率。2023 年，中国科学院国家空间科学中心采用同相功率合成技术，研发了一种 170 GHz 高功率倍频器^[80]，如图 13(b)所示。利用 T 型结功率分配器和 2 个弯曲波导的组合，消除 T 型结功率分配器 2 个输出端口之间的相位差，以简洁的结构实现同相功率合成。在 350~400 mW 输入功率下，该倍频器在 165~180 GHz 频段内的转换效率为 11%~31.3%；在输入功率为 376 mW 时，在 174 GHz 下测得峰值输出功率为 118 mW，转换效率为 31.3%。

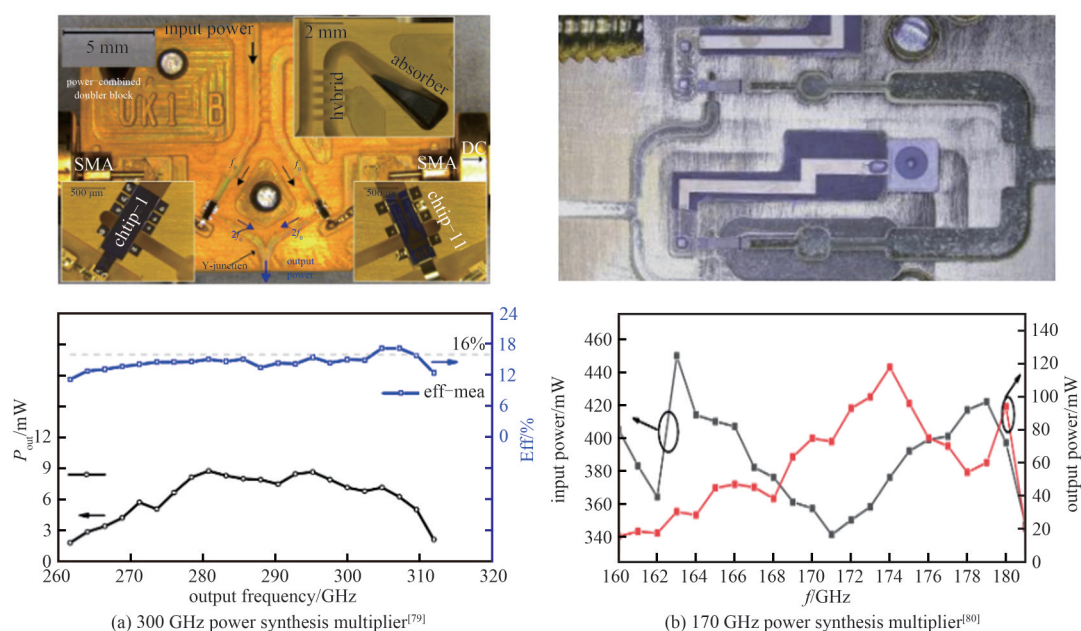


Fig.13 Power synthesis multiplier and test results

图 13 功率合成倍频器及测试结果

3 太赫兹混频技术

在固态收发系统前端需要进行频率变换的过程，频率的转换由混频器完成。混频器一般分为二极管混频器和三极管混频器，二极管混频器通常只需较低的导通电压，功耗较低且电路结构简单，易于实现。此外以肖特基二极管为代表的混频电路还具有低噪声系数、良好的高频特性和动态特性等优点，常用于太赫兹频段混频电

路设计。肖特基混频器作为信号发生器和检测器，是太赫兹收发器件的核心元件。

3.1 混频器工作原理

混频器是一种三端口的非线性器件，射频(RF)和本振(Local Oscillator, LO)端口为输入端，中频(Intermediate Frequency, IF)为输出端口，混频器的结构如图 14 所示。中频输出的频率分量中存在射频频率、本振的 n 次谐波与射频频率的混频等成分。

频器根据本振信号的非线性次数可分为基波混频器和谐波混频器，后者又可细分为分谐波混频器和高次谐波混频器。基波混频器的设计通常较为简单，只采用一个混频二极管，隔离度和噪声系数等指标都比其他电路差。混频器中最早出现，应用也最为广泛的是基波混频器，基波混频器能够实现较低的变频损耗和较大的动态范围，但可能存在本振泄漏问题，对于本振源输出稳定性要求较高。谐波混频器利用多只二极管的结构，通过管芯之间的相位关系，使奇次或偶次的谐波分量被抵消，从而降低了本振相位噪声，并减小了变频损耗。与基波混频器相比，谐波混频器的设计在利用谐波成分方面更加高效。谐波混频器利用本振信号的偶次或奇次谐波与接收到的射频信号进行混频，因此所需的本振工作频率仅为射频信号频率的 $1/n$ (n 为正整数)。谐波混频器对本振源的要求较低，能有效降低电路成本，同时简化滤波器设计。此外，混频器还可根据是否外接偏置分为有源混频器和无源混频器。有源混频器提供良好的带宽特性，但其线性度和噪声性能较差；无源混频器则具有较低的噪声系数和良好的线性度，更适合高要求的接收机。



Fig.14 Working principle of mixer
图 14 混频器工作原理

3.2 基于单片集成的混频器

尽管倒装芯片混频器在早期的高频应用中曾展现出显著的性能优势，但制造成本高，封装工艺复杂以及在高功率条件下的热可靠性等问题限制了其广泛应用。随着技术的不断进步和市场需求的变化，单片集成混频器逐渐成为更优越的解决方案。相比之下，单片集成混频器通过在单一衬底上集成所有必要的电路，不仅简化了制造流程，降低了成本，还显著提升了性能和可靠性。

早在 1975 年，M Conh 等^[81]已经开始研究用反向并联二极管对实现谐波混频的方法。随着半导体技术和单片集成技术的迅速发展，谐波混频器的设计方法不断更新，混频器朝着微型化、集成化方向发展。2013 年，美国弗吉尼亚二极管公司基于截止频率为 2 THz 的平面肖特基二极管工艺研制了低损耗宽带谐波混频器^[82]，并应用在锁相太赫兹量子级联激光器系统中。所研制的三次谐波混频器转换损耗为 27 dB，四次谐波混频器转换损耗为 30 dB。目前，国际上主流技术为单片集成工艺。2018 年，卢瑟福阿普尔顿实验室的 D Pardo 等^[83]围绕 3.5 THz 基波混频器展开了研究，在频率为 3.44 THz，本振输入功率为 6 mW 的情况下，该混频器的双边带(Double Side Band, DSB)变频损耗在 15.5 dB 左右。

2020 年，电子科技大学的杨益林等^[84]设计了一款基于 GaAs 单片集成技术的宽带 220 GHz 次谐波混频器，如图 15(a)所示，该混频器采用具有紧凑型微带谐振单元配置的中频低通滤波器和改进的垂直同轴电缆至微带连接实现宽 IF 频带。最终测试结果表明，该混频器在 110 GHz 的固定本振频率下，测得的单边带(Single Side Band, SSB)变频损耗在 185~255 GHz 范围内为 7.4~11.7 dB。2021 年，纳瓦拉公立大学的 J M Pérez-Escudero 等^[85]研制了一种具有集成本振的 300 GHz 四次谐波肖特基二极管混频器，将工作在 75 GHz 左右、基于单片集成的本振输入与混频器集成在同一个金属块内。测试结果表明该混频器的最佳测量转换损耗为 14 dB，等效噪声温度为 9 600 K。2022 年，电子科技大学的冯伟等^[86]研制了一款 340 GHz 分谐波混频器，如图 15(b)所示。该混频器将两级简化匹配技术与改进的有源电路模型相结合，在 320~360 GHz 射频范围内，340 GHz 次谐波混频器的 SSB 变频损耗低于 9.5 dB，最佳值为 8.95 dB。同年，中国工程物理研究院的何月等^[87]设计了一款 1 THz 单片集成分谐波混频器，采用紧凑的无源滤波器和匹配网络。经过实验测试，该 1 THz 分谐波混频器的双边带噪声温度小于 5 000 K，变频损耗优于 13 dB。

2024 年，电子科技大学的于波等^[88]设计了一种适合 3D 集成的 200 GHz 次谐波混频器，如图 15(c)所示。该混频器采用垂直波导到微带的过渡实现与其他组件的垂直互连，其 198~216 GHz 的单边带(Single Side Band, SSB)变频损耗优于 14 dB。与平面集成相比，3D 集成结构更紧凑，面积更小。同年，北京理工大学的刘松卓等^[89]开发了 340 GHz 的 GaAs 单片集成分谐波混频器，采用新型的反向并联二极管结构。经过测试，该上变频混频器在 311~349 GHz 范围内的 SSB 转换损耗最低为 9.4 dB，最大输出功率达到 0.21 mW。

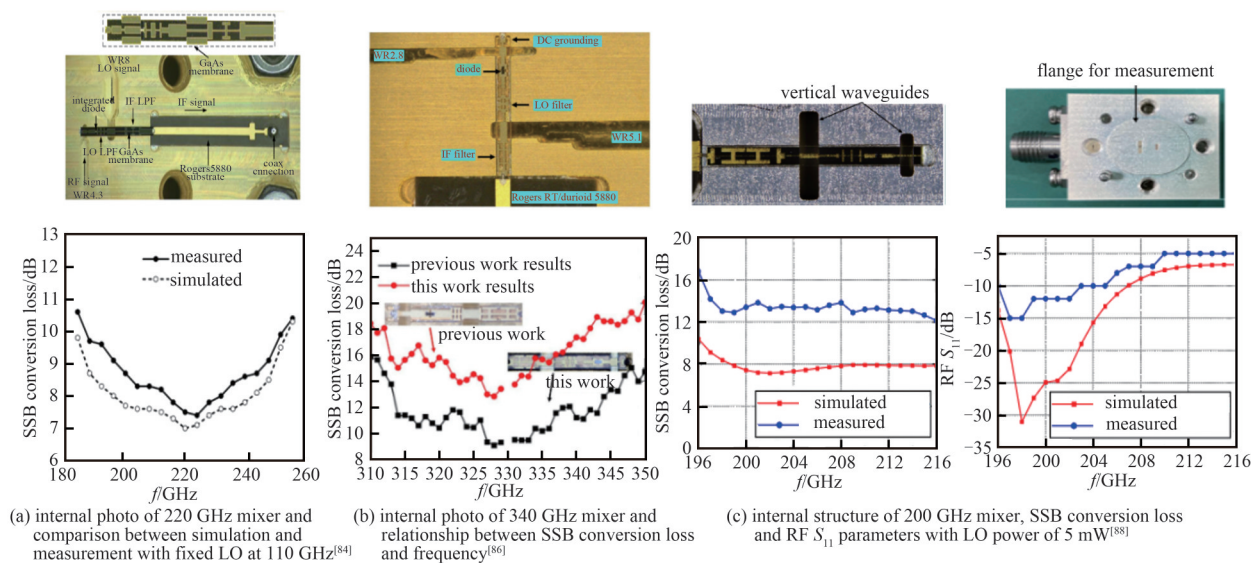


Fig.15 Structure and test curves of terahertz monolithic integrated mixer

图 15 太赫兹单片集成混频器结构及测试曲线

3.3 正交混频器

正交混频器也叫 I/Q 混频器，混频器中的输入信号利用正交网络或功分网络分别输入到 2 个混频器中混频，实现两路中频输出信号正交。相较于传统的混频器，I/Q 混频器在太赫兹通信系统中应用广泛，可用于太赫兹直接调制。太赫兹通信发射机中采用直接调制方式可大幅降低传输损耗，减小互联及封装对混频器带宽和损耗影响，实现高灵敏度接收和高速率传输。

早期研制的 330 GHz 频段的太赫兹 I/Q 混频器^[90]取得了良好的性能，引发研究者持续的关注与改进。2019 年，智利大学的 D Monasterio 等^[91]研制了一款适用于 W 频段的边带分离接收器模块，如图 16(a)所示。该接收机在射频端采用正交耦合结构、本振端采用功分电路形式进入电路混频，混频器采用砷化镓单片集成技术。测试结果显示，该接收机镜像抑制高于 10 dB。2023 年，电子科技大学的陈小明等^[92]研制了 330 GHz 正交混频器，通过公式得出正交混频器的镜像抑制制度与本振信号幅度相位不平坦度的关系，并说明了两路混频器本振端口隔离度和驻波对镜像抑制制度的干扰。在最佳的本振工作点驱动下，该正交混频器的下变频镜像抑制制度带内大于 11 dB。同年，电子科技大学的邓贺钢^[93]研制了 220 GHz 单片集成 I/Q 镜像抑制混频器，如图 16(b)所示，该混频器采用射频端及本振端“正交双耦合”结构。实验结果表明，当本振频率为 110 GHz 时，在 206~225 GHz 频段内，镜像抑制制度优于 10 dB，最佳值为 27.5 dB。

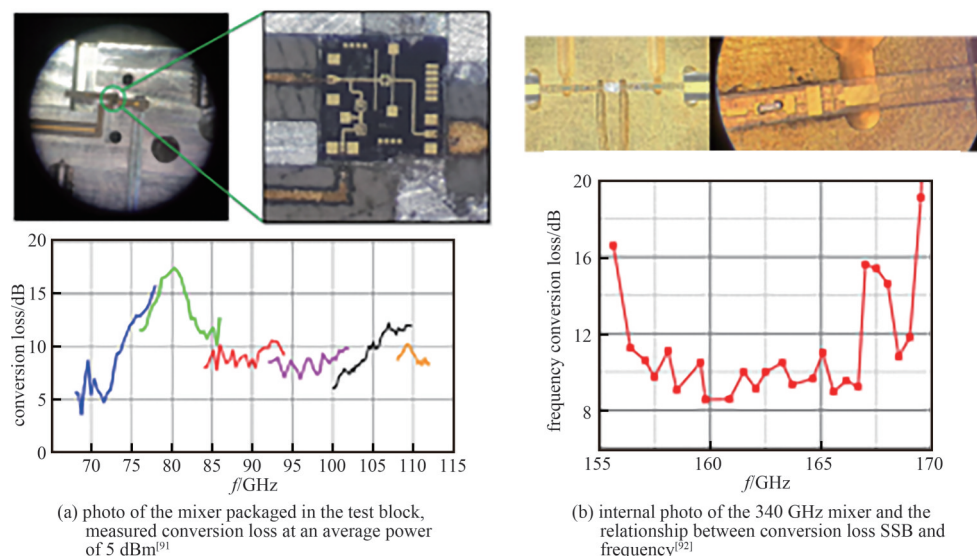


Fig.16 Structure and test curves of terahertz I/Q mixer

图 16 太赫兹 IQ 混频器结构及测试曲线

4 结论与展望

本文综述了基于平面肖特基二极管的太赫兹变频器件的研究进展。随着半导体技术的成熟,大大扩展了太赫兹平面肖特基二极管应用范围,并逐渐取代了触须式肖特基二极管。早期,分立二极管通过倒装工艺与微带电路混合,在低太赫兹频率下具有低成本、灵活性和低衬底损耗的优点。随着工作频率的提高,出现了将平面二极管集成在衬底上的半导体工艺,不仅减少了二极管组装中引入的寄生参数,还提高了电路尺寸的工艺精确度。在高太赫兹频段,单片集成技术的进步使得将完整的太赫兹收发链路集成在一个金属腔体中成为可能。虽然基于肖特基二极管的太赫兹变频技术在过去 20 年里取得了很好的进展,但仍面临许多挑战。通信和天文探测等领域对肖特基二极管的要求越来越高:在通信方面,需要减小肖特基二极管的尺寸促进集成发展,需要提高二极管的输入功率,增加系统的通信距离;在天文探测方面,肖特基二极管需要适应温度和空间环境,提高抗电磁干扰能力以及增强对太赫兹信号的灵敏度等。太赫兹变频器件将继续向高频、高效率、大功率和高可靠性 4 个方向发展。随着制造工艺的不断创新和突破,必然会带动太赫兹变频器件的进步,从而推动太赫兹技术的快速发展。

参考文献:

- [1] OKADA K, LI N, MATSUSHITA K, et al. A 60-GHz 16QAM/8PSK/QPSK/BPSK direct-conversion transceiver for IEEE802[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011,46(12):2988-3004.
- [2] APPLEBY R, ANDERTON R N. Millimeter-wave and submillimeter-wave imaging for security and surveillance[J]. Proceedings of the IEEE, 2007,95(8):1683-1690. doi:10.1109/JPROC.2007.898832.
- [3] FRIEDERICH F, VON-SPIEGEL W, BAUER M, et al. THz active imaging systems with real-time capabilities[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):183-200. doi:10.1109/TTHZ.2011.2159559.
- [4] LIU H B, ZHONG H, KARPOWICZ N, et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2007,95(8):1514-1527. doi:10.1109/JPROC.2007.898903.
- [5] HU Peng, LEI Wenqiang, JIANG Yi, et al. Development of a 0.32 THz folded waveguide traveling wave tube[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018,65(6):2164-2169. doi:10.1109/TED.2017.2787682.
- [6] SHUR M. Terahertz technology: devices and applications[C]// Proceedings of the 35th European Solid-State Device Research Conference. Grenoble, France: IEEE, 2005:13-21. doi:10.1109/ESSDER.2005.1546574.
- [7] MUELLER E R, HENSCHKE R, ROBOTHAM W E J, et al. Terahertz local oscillator for the microwave limb sounder on the aura satellite[J]. Applied Optics, 2007,46(22):4907-4915. doi:10.1364/ao.46.004907.
- [8] BOOSKE J H, DOBBS R J, JOYE C D, et al. Vacuum electronic high power terahertz sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):54-75. doi:10.1109/TTHZ.2011.2151610.
- [9] EISELE H. State of the art and future of electronic sources at terahertz frequencies[J]. Electronics Letters, 2010,46(26):S8-S11. doi:10.1049/el.2010.3319.
- [10] SMITH P M, LIU S M J, KAO M Y, et al. W-band high efficiency InP-based power HEMT with 600 GHz fmax[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1995,5(7):230-232. doi:10.1109/75.392284.
- [11] HAFEZ W, FENG M. Experimental demonstration of pseudomorphic heterojunction bipolar transistors with cutoff frequencies above 600 GHz[J]. Applied Physics Letters, 2005,86(15):152101. doi:10.1063/1.1897831.
- [12] RODWELL M J W. High-speed integrated circuit technology: towards 100 GHz logic[M]. Singapore, River Edge, NJ: World Scientific, 2001. doi:10.1142/4716.
- [13] GATILOVA L, MAESTRINI A, TREUTTEL J, et al. Recent progress in the development of French THz Schottky diodes for astrophysics, planetology and atmospheric study[C]// 2019 the 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Paris, France: IEEE, 2019:1-2. doi:10.1109/IRMMW-THz.2019.8873728.
- [14] JAYASANKAR D, DRAKINSKIY V, MYREMARK M, et al. Design and development of 3.5 THz Schottky-based fundamental mixer[C]// 2020 the 50th European Microwave Conference(EuMC). Utrecht, Netherlands: IEEE, 2021:595-598. doi:10.23919/EuMC48046.2021.9338204.
- [15] MAESTRINI A, MEHDI I, SILES J V, et al. Frequency tunable electronic sources working at room temperature in the 1 to 3 THz band[J]. Proceedings of SPIE, 2012(8496):84960F. doi:10.1117/12.929654.
- [16] TREUTTEL J, GATILOVA L, MAESTRINI A, et al. A 520-620-GHz Schottky receiver Front-End for planetary science and remote sensing with 1 070 K-1 500 K DSB noise temperature at room temperature[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016,6(1):148-155. doi:10.1109/TTHZ.2015.2496421.

- [17] SCHLECHT E, SILES J V, LEE C, et al. Schottky diode based 1.2 THz receivers operating at room-temperature and below for planetary atmospheric sounding[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(6):661–669. doi:10.1109/TTHZ.2014.2361621.
- [18] MAESTRINI A, GATILOVA L, TREUTTEL J, et al. The 1 200 GHz receiver frontend of the submillimetre wave instrument of ESA Jupiter ICy moons explorer[C]// 2018 the 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Nagoya, Japan: IEEE, 2018:1–2. doi:10.1109/IRMMW-THz.2018.8509935.
- [19] SCHOTTKY W. Zur halbleiterttheorie der sperrschicht-und spitzengleichrichter[J]. Zeitschrift für Physik, 1939, 113(5):367–414. doi:10.1007/BF01340116.
- [20] SENGUPTA D L, SARKAR T K, SEN D. Centennial of the semiconductor diode detector[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(1):235–243. doi:10.1109/5.658775.
- [21] 吴成凯. 平面肖特基二极管建模及太赫兹倍频技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022. (WU Chengkai. Modeling of planar Schottky diodes and research on terahertz frequency multiplication technology[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.) doi:10.27005/d.cnki.gdzku.2022.000084.
- [22] BISHOP W L, MCKINNEY K, MATTAUCH R J, et al. A novel whiskerless Schottky diode for millimeter and submillimeter wave application[C]// 1987 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Palo Alto, CA, USA: IEEE, 1987:607–610. doi:10.1109/MWSYM.1987.1132483.
- [23] MARTIN S, NAKAMURA B, FUNG A, et al. Fabrication of 200 to 2 700 GHz multiplier devices using GaAs and metal membranes[J]. 2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2001(3):1641–1644. doi:10.1109/MWSYM.2001.967219.
- [24] KOU W, LIANG S, ZHOU H, et al. A review of terahertz sources based on planar Schottky diodes[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(3):467–487. doi:10.1049/cje.2021.00.302.
- [25] SILES J V. Design and optimization of frequency multipliers and mixers at millimeter and submillimeter-wave bands[D]. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [26] 田爱华, 邢东, 赵向阳, 等. GaAs/AlN 异质集成太赫兹倍频器芯片[J]. 半导体技术, 2022, 47(1):60–64. (TIAN Aihua, XING Dong, ZHAO Xiangyang, et al. GaAs/AlN heterogeneous integration terahertz frequency multiplier chip[J]. Semiconductor Technology, 2022, 47(1):60–64.) doi:10.13290/j.cnki.bdtjs.2022.01.011.
- [27] 邢东, 冯志红, 王俊龙, 等. 阳极端点支撑空气桥结构太赫兹 GaAs 二极管[J]. 半导体技术, 2013, 38(4):279–282. (XING Dong, FENG Zhihong, WANG Junlong, et al. THz GaAs Schottky diodes with anode endpoint supported airbridge structure[J]. Semiconductor Technology, 2013, 38(4):279–282.)
- [28] LI Qian, AN Ning, TONG Xiaodong, et al. Planar Schottky barrier diode with a cutoff frequency of 8.7 THz[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(5):679–683. doi:10.11805/TKYDA201505.0679.
- [29] LIANG Shixiong, XING Dong, WANG Junlong, et al. Terahertz Schottky barrier diodes based on homoepitaxial GaN materials[C]// 2015 the 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Hong Kong, China: IEEE, 2015:1–2. doi:10.1109/IRMMW THz.2015.7327726.
- [30] LIANG Shixiong, GU Guodong, GUO Hongyu, et al. Homoepitaxial GaN terahertz planar Schottky barrier diodes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(48):484004.
- [31] DI GIOIA G, SAMNOUNI M, CHINNI V, et al. GaN Schottky diode on sapphire substrate for THz frequency multiplier applications[J]. Micro and Nanostructures, 2022(164):107116. doi:10.1016/j.spmi.2021.107116.
- [32] DI GIOIA G, FRAYSSINET E, SAMNOUNI M, et al. High breakdown voltage GaN Schottky diodes for THz frequency multipliers[J]. Journal of Electronic Materials, 2023, 52(8):5249–5255. doi:10.1007/s11664-023-10499-3.
- [33] 冯志红. 太赫兹固态器件研究进展[J]. 中国科学, 2023, 52(4):123–130. (FENG Zhihong. Progress in research on terahertz solid-state devices[J]. Science China, 2023, 52(4):123–130.)
- [34] PORTERFIELD D W. High-efficiency terahertz frequency triplers[C]// 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2007:337–340. doi:10.1109/MWSYM.2007.380439.
- [35] 姚常飞, 周明, 罗运生, 等. 基于倒扣技术的 190~225 GHz 肖特基二极管高效率二倍频器[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(1):6–9, 28. (YAO Changfei, ZHOU Ming, LUO Yunsheng, et al. A 190~225 GHz high efficiency Schottky diode doubler with circuit substrate flip-chip mounted[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(1):6–9, 28.) doi:10.3724/SP.J.1010.2015.00006.
- [36] CHEN Z, WANG H, ALDERMAN B, et al. 190 GHz high power input frequency doubler based on Schottky diodes and AlN substrate[J]. IEICE Electronics Express, 2016, 13(22):20160981. doi:10.1587/elex.13.20160981.
- [37] WU Chengkai, ZHANG Yong, LI Yukun, et al. A balanced frequency doubler covering 140~220 GHz with an efficiency of 6.8%~11.6%[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(8):1003–1006. doi:10.1109/LMWC.2022.3160707.

- [38] WANG Li,ZHANG Dehai,MENG Jin,et al. A high efficiency and high power 165~180 GHz balanced doubler based on Schottky diode[J]. *Microelectronics Journal*, 2023(140):105924. doi:10.1016/j.mejo.2023.105924.
- [39] WANG H,PARDON D,MERRITT M,et al. 280 GHz frequency multiplied source for meteorological Doppler radar applications[C]// 2015 the 8th UK,Europe,China Millimeter Waves and THz Technology Workshop(UCMMT). Cardiff,UK:IEEE, 2015:1-4. doi: 10.1109/UCMMT.2015.7460628.
- [40] MENG Jin,ZHANG Dehai,YAO Changfei,et al. Design of a 225 GHz high output power tripler based on unbalanced structure[J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2015(56):101-108. doi:10.2528/PIERC15012001.
- [41] GUO C,SHANG X B,LANCASTER M J,et al. A 135~150-GHz frequency tripler with waveguide filter matching[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018,66(10):4608-4616. doi:10.1109/TMTT.2018.2855172.
- [42] GUO C,DHAYALAN Y,SHANG X B,et al. A 135~150-GHz frequency tripler using SU-8 micromachined WR-5 waveguides[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(3): 1035-1044. doi: 10.1109/TMTT. 2019. 2955684.
- [43] LI Yuhang,ZHANG Dehai,MENG Jin,et al. 335 GHz unbalanced Schottky diode frequency tripler[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023,42(2):230-233. doi:10.11972/j.issn.1001-9014.2023.02.013.
- [44] SCHLECHT E,CHATTOPADHYAY G,MAESTRINI A,et al. 200,400 and 800 GHz Schottky diode "substrateless" multipliers: design and results[C]// 2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(Cat. No.01CH37157). Phoenix,AZ,USA: IEEE, 2001:1649-1652. doi:10.1109/MWSYM.2001.967221.
- [45] HENRY M,ALDERMAN B,SANGHERA H,et al. High-efficiency transferred substrate GaAs varactor multipliers for the terahertz spectrum[C]// *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*. Orlando,Florida,United States: SPIE, 2010:76710U. doi:10.1117/12.850205/.
- [46] COJOCARI O,OPREA I,GIBSON H,et al. SubMM-wave multipliers by film-diode technology[C]// 2016 the 46th European Microwave Conference(EuMC). London,UK:IEEE, 2016:337-340. doi:10.1109/EuMC.2016.7824347.
- [47] MONTERO-DE-PAZ J,SOBORNITSKY M,HOEFLE M,et al. High power 150 GHz Schottky based varactor doubler[C]// 2016 Global Symposium on Millimeter Waves(GSMM) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications. Espoo,Finland:IEEE, 2016:1-4. doi:10.1109/GSMM.2016.7500328.
- [48] KIURU T,MALLAT J,RÄISÄNEN A V,et al. Compact broadband MMIC Schottky frequency tripler for 75~140 GHz[C]// 2011 the 6th European Microwave Integrated Circuit Conference. Manchester,UK:IEEE, 2011:108-111.
- [49] KIURU T,DAHLBERG K,MALLAT J,et al. Schottky frequency doubler for 140~220 GHz using MMIC foundry process[C]// 2012 the 7th European Microwave Integrated Circuit Conference. Amsterdam,Netherlands:IEEE, 2012:84-87.
- [50] DRAKINSKIY V,SOBIS P,ZHAO H,et al. Terahertz GaAs Schottky diode mixer and multiplier MIC's based on e-beam technology[C]// 2013 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials(IPRM). Kobe,Japan:IEEE, 2013:1-2. doi:10.1109/ICIPRM.2013.6562606.
- [51] YANG F,TREUTTEL J,MAESTRINI A,et al. Solid state 448 GHz frequency doubler using integrated Schottky membrane technology[C]// 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings(APMC). Seoul,Korea(South):IEEE, 2013:833-835. doi: 10.1109/APMC.2013.6694949.
- [52] SILES J V,SCHLECHT E,LIN R,et al. High-efficiency planar Schottky diode based submillimeter-wave frequency multipliers optimized for high-power operation[C]// 2015 the 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). Hong Kong,China:IEEE, 2015:1-1. doi:10.1109/IRMMW-THz.2015.7327677.
- [53] KOU Wei,ZHOU Hongji,LIANG Shixiong,et al. Terahertz frequency quadrupler based on a 2×2 single-chip GaAs monolithic integration[C]// 2021 IEEE the 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Helsinki, Finland: IEEE, 2021:1-6. doi:10.1109/PIMRC50174.2021.9569614.
- [54] 何月,田遥岭,周人,等. 用于超外差接收机提供本振源的高功率 510 GHz 单片集成三倍频器[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(5):863-870. (HE Yue,TIAN Yaoling,ZHOU Ren,et al. High power 510 GHz monolithic integrated frequency tripler for local oscillation sources in heterodyne receiver[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022,41(5):863-870.)
- [55] JI Dongfeng,WANG Dongshuang,DAI Kunpeng,et al. A terahertz broadband tripler using Schottky diode and monolithic integrated technology[C]// 2023 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications(IMWS-AMP). Chengdu,China:IEEE, 2023:1-3. doi:10.1109/IMWS-AMP57814.2023.10381278.
- [56] 徐森锋,宋旭波,顾国栋,等. 多阳极 220 GHz 倍频器单片设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2023,21(9):1080-1085. (XU Senfeng,SONG Xubo,GU Guodong,et al. Design of 220 GHz frequency doubler MMIC with multi-anode structure[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2023,21(9):1080-1085.) doi:10.11805/TKYDA2022184.

- [57] JOHNSON W C, PARSONS J B. The preparation of gallium tribromide and gallium triiodide[J]. The Journal of Physical Chemistry, 2002,34(6):1210–1214. doi:10.1021/j150312a007.
- [58] JOHNSON W C, PARSONS J B. Nitrogen compounds of gallium. I, II[J]. The Journal of Physical Chemistry, 2002,36(10):2588–2594.
- [59] AMANO H, KITO M, HIRAMATSU K, et al. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation(LEEBI)[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1989,28(12):L2112–L2114.
- [60] PEARTON S J, REN F, ZHANG A, et al. Fabrication and performance of GaN electronic devices[J]. Materials Science and Engineering R: Reports, 2000(30):55–212. doi:10.1016/S0927-796X(00)00028-0.
- [61] MARGOMENOS A, KURDOGHLIAN A, MICOVIC M, et al. GaN technology for E, W and G-band applications[C]// 2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). La Jolla, CA, USA: IEEE, 2014: 1–4. doi: 10.1109/CSICS. 2014. 6978559.
- [62] SCHELLENBERG J M. A 2 W W-band GaN traveling-wave amplifier with 25-GHz bandwidth[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015,63(9):2833–2840. doi:10.1109/TMTT.2015.2453156.
- [63] PEARTON S J, ZOLPER J C, SHUL R J, et al. GaN: processing, defects, and devices[J]. Journal of Applied Physics, 1999,86(1):1–78. doi:10.1063/1.371145.
- [64] FENG Z H, LIANG S X, XING D, et al. High-frequency multiplier based on GaN planar Schottky barrier diodes[C]// 2016 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications(IMWS-AMP). Chengdu, China: IEEE, 2016: 1–3. doi:10.1109/IMWS-AMP.2016.7588336.
- [65] ZHANG Bo, JI Dongfeng, FANG Deng, et al. A novel 220-GHz GaN diode on-chip tripler with high driven power[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019,40(5):780–783. doi:10.1109/LED.2019.2903430.
- [66] LIANG Shixiong, SONG Xubo, ZHANG Lisen, et al. A 177~183 GHz high-power GaN-based frequency doubler with over 200 mW output power[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020,41(5):669–672. doi:10.1109/LED.2020.2981939.
- [67] ZHANG Lisen, LIANG Shixiong, LYU Yuanjie, et al. High-power 300 GHz solid-state source chain based on GaN doublers[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021,42(11):1588–1591. doi:10.1109/LED.2021.3110781.
- [68] 郭艳敏, 张立森, 顾国栋, 等. 基于单片集成电路的 180 GHz 大功率倍频器[J]. 固体电子学研究进展, 2023,43(6):486–491. (GUO Yanming, ZHANG Lisen, GU Guodong, et al. 180 GHz high-power frequency multiplier based on monolithic integrated circuit[J]. Research & Progress of SSE, 2023,43(6):486–491.)
- [69] AN Ning, LI Li, WANG Weiguang, et al. High-efficiency D-band monolithically integrated GaN SBD-based frequency doubler with high power handling capability[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022,69(9):4843–4847. doi:10.1109/TED.2022.3190463.
- [70] SONG Xubo, LIANG Shixiong, LYU Yuanjie, et al. GaN-based frequency doubler with pulsed output power over 1 W at 216 GHz[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021,42(12):1739–1742. doi:10.1109/LED.2021.3119391.
- [71] LIU Honghui, LIANG Zhiwen, MENG Jin, et al. 120 GHz frequency-doubler module based on GaN Schottky barrier diode[J]. Micromachines, 2022,13(8):1172. doi:10.3390/mi13081172.
- [72] DONG Yazhou, LIANG Huajie, LIANG Shixiong, et al. High-efficiency GaN frequency doubler based on thermal resistance analysis for continuous wave input[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023,70(9):4565–4571. doi:10.1109/TED.2023.3294897.
- [73] ZHANG Lisen, GU Guodong, LIANG Shixiong, et al. High-efficiency GaN/SiC doubler terahertz monolithic integrated circuit at 175 GHz[J]. IEEE Electron Device Letters, 2023,44(3):376–379. doi:10.1109/LED.2023.3239653.
- [74] LIANG Zhiwen, LIU Honghui, MENG Jin, et al. Monolithic integrated GaN-based 120 GHz frequency doubler on sapphire[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023,56(42):425104.
- [75] SILES J V, LEE C, LIN R, et al. Capability of broadband solid-state room-temperature coherent sources in the terahertz range[C]// 2014 the 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Tucson, AZ, USA: IEEE, 2014: 1–3. doi:10.1109/IRMMW-THz.2014.6956427.
- [76] CROWE T W, HESLER J L, RETZLOFF S A, et al. Higher power terahertz sources based on diode multipliers[C]// 2017 the 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Cancun, Mexico: IEEE, 2017: 1–1. doi: 10.1109/IRMMW-THz.2017.8067091.
- [77] VIEGAS C, LIU H R, POWELL J, et al. A 180-GHz Schottky diode frequency doubler with counter-rotated E -fields to provide in-phase power-combining[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018,28(6):518–520. doi:10.1109/LMWC.2018.2824561.

- [78] DING J Q, MAESTRINI A, GATILOVA L, et al. A 300 GHz power-combined frequency doubler based on E -plane 90° -hybrid and Y -junction[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(8):2683–2691. doi:10.1002/mop.32146.
- [79] DING J Q, MAESTRINI A, GATILOVA L, et al. High efficiency and powerful 260~340 GHz frequency doublers based on Schottky diodes[C]// 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. Rome, Italy: IEEE, 2020: 1–4. doi:10.23919/URSIGASS49373.2020.9232347.
- [80] WANG Li, ZHANG Dehai, MENG Jin, et al. A high-power 170 GHz in-phase power-combining frequency doubler based on Schottky diodes[J]. Micromachines, 2023, 14(8):1530. doi:10.3390/mi14081530.
- [81] COHN M, DEGENFORD J E, NEWMAN B A. Harmonic mixing with an antiparallel diode pair[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1975, 23(8):667–673. doi:10.1109/TMTT.1975.1128646.
- [82] BULCHA B T, KURTZ D S, GROPP C, et al. THz Schottky diode harmonic mixers for QCL phase-locking[C]// 2013 the 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Mainz, Germany: IEEE, 2013: 1–2. doi:10.1109/IRMMW-THz.2013.6665858.
- [83] PARDO D, ELLISON B N, HUGGARD P G, et al. Development of techniques for the design of a 3.5 THz fundamental balanced Schottky heterodyne mixer[C]// 2018 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMIC). Brive La Gaillarde, France: IEEE, 2018: 1–3. doi:10.1109/INMMIC.2018.8430018.
- [84] YANG Yilin, ZHANG Bo, JI Dongfeng, et al. Development of a wideband 220-GHz subharmonic mixer based on GaAs monolithic integration technology[J]. IEEE Access, 2020(8):31214–31226. doi:10.1109/ACCESS.2020.2973399.
- [85] PÉREZ-ESCUADERO J M, QUEMADA C, GONZALO R, et al. A millimeter-wave 4th-harmonic Schottky diode mixer with integrated local oscillator[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16):7238. doi:10.3390/app11167238.
- [86] FENG Wei, YANG Penglin, SUN Xuechun, et al. Development of 0.34 THz sub-harmonic mixer combining two-stage reduced matching technology with an improved active circuit model[J]. Applied Sciences, 2022, 12(24):12855. doi:10.3390/app122412855.
- [87] HE Yue, LI Li, LIU Ge, et al. A 1 THz Schottky transceiver front-end based on 5 μm GaAs monolithic membrane[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64(12):2143–2150. doi:10.1002/mop.33424.
- [88] YU Bo, WANG Zhigang, ZHANG Haihui, et al. A 0.2 THz sub-harmonic mixer with vertical waveguides for 3D integrated systems[C]// 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Harbin, China: IEEE, 2022: 1–3. doi:10.1109/ICMMT55580.2022.10023360.
- [89] LIU Songzhuo, NIU Bin, WANG Bowu, et al. A 340 GHz upconversion mixer MMIC using an antiparallel series Schottky diode pair with high output power[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2024, 34(7):927–930. doi:10.1109/LMWT.2024.3401579.
- [90] THOMAS B, REA S, MOYNA B, et al. A 320~360 GHz subharmonically pumped image rejection mixer using planar Schottky diodes[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(2):101–103. doi:10.1109/LMWC.2008.2011332.
- [91] MONASTERIO D, JARUFE C, GALLARDO D, et al. A compact sideband separating downconverter with excellent return loss and good conversion gain for the W band[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019, 9(6):572–580. doi:10.1109/TTHZ.2019.2937955.
- [92] 陈小明. 330 GHz 正交混频器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023. (CHEN Xiaoming. Research on 330 GHz orthogonal mixer[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.)
- [93] 邓贺钢. 220 GHz 单片集成 IQ 镜像抑制混频技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023. (DENG Hegang. Research on 220 GHz monolithic integrated I/Q image rejection mixing technology[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.) doi:10.27005/d.cnki.gdzku.2023.004230.

作者简介:

薛欣童(2001–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为集成电路. email:2976306995@qq.com.

李战峰(1978–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为半导体光电子与信息技术.

张海涛(1986–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为大型精密测量装备设计与研制、系统模型构建、系统误差标定与补偿技术、控制软件与数据评价软件开发、面向工业现场的自动化设备研制.

郝晓林(1996–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹器件.

梁士雄(1981–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为太赫兹肖特基二极管、太赫兹混频器和倍频器.