

激光与光电子学进展

太赫兹混频器技术研究进展

周健*, 尤立星, 彭炜, 王镇

中国科学院上海微系统与信息技术研究所超导电子学实验室, 上海 200050

摘要 太赫兹混频器可通过本征信号与原信号混合, 经频率变换, 实现频谱探测、超分辨率成像和天文信号高灵敏探测, 在太赫兹频谱识别、太赫兹安检、射电天文探测等领域具有重要应用前景。本文首先介绍了太赫兹混频器的基本原理、分类、主流技术方案; 其次针对太赫兹混频器超灵敏化、高频化、中频宽带化和小型化集成的应用需求, 分析了国内外太赫兹混频器设计与制作技术的发展动态; 最后归纳了太赫兹混频器的应用状况、技术挑战和可能的解决方案, 以便阐明三类太赫兹混频器的技术特点和技术发展趋势。

关键词 超快光学; 太赫兹; 混频器

中图分类号 TN773

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222081

Research Progress of Terahertz Mixer Technology

Zhou Jian*, You Lixing, Peng Wei, Wang Zhen

*Laboratory of Superconductor Electronics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*

Abstract Terahertz mixers can mix the original signal with the intrinsic signal and transform the frequency to achieve spectrum detection, super-resolution imaging, and highly sensitive detection of astronomical signals, which have important potential applications in terahertz spectrum identification, terahertz security inspection, and radio astronomical detection. First, this paper introduces the basic principle, classification, and main technical scheme of terahertz mixer. Second, according to the application requirements of ultra sensitivity, high frequency, intermediate frequency broadband, and miniaturization integration of terahertz mixers, the global development trends in the design and manufacturing technology of terahertz mixer are analyzed. Finally, the applicability, technical challenges, and possible solutions of terahertz mixers are summarized to elucidate the technical characteristics of three types of terahertz mixers and identify the technical development trends.

Key words ultrafast optics; terahertz; mixer

1 引言

太赫兹 (THz) 波是频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波, 具有高频、高带宽、高穿透性、高度空间和时间分辨率等特点。太赫兹技术被美国评为“改变未来世界的十大技术”之一, 在通信、探测、成像和谱线识别研究等领域具有重要应用潜力。常规低频段混频器基于波导工艺, 受到机械加工工艺限制, 难以工作在太赫兹波段, 随着微电子工艺发展, 微加工精度不断提升, 为混频器频率提升提供技术手段。作为高灵敏度接收器的关键技术之一, 太赫兹混频器技术成为产业界关注

的焦点。太赫兹超导混频器在 2021、2022 年连续被列入科技部重点专项指南, 说明其在探测灵敏度等方面尚待突破, 有必要开展攻关。因此, 开展太赫兹混频器技术研究对解释太赫兹混频器超高灵敏探测机理具有重要的学术研究价值, 对于我国尽快抢占技术制高点 and 形成自主知识产权具有社会意义, 对于完善通信、成像、高灵敏天文观测产业链具有重要的经济价值。本文旨在阐述混频器的原理、分类和国内外发展状况, 阐明太赫兹混频器的高频段、大宽带、超灵敏、小型化发展趋势, 为太赫兹混频器学术研究和产业发展提供借鉴。

收稿日期: 2022-07-15; 修回日期: 2022-08-29; 录用日期: 2022-08-31; 网络首发日期: 2022-09-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (6173000272)

通信作者: *zjian@mail.sim.ac.cn

2 国内外太赫兹混频器技术发展

2.1 太赫兹混频器基本原理与分类

2.1.1 太赫兹混频器基本原理

混频过程实质是频谱线性搬移的过程,又称为变频,分为上变频和下变频。将输入信号频率变低称为下变频,将输入信号频率提高称为上变频。实现频率变换的电路或模块称为混频器,时域乘积可以换算为频域的加减法,因此,频率搬移实现的最基本理论模型可描述为

$$[A\cos(\omega_1 t)][B\cos(\omega_2 t)] = \frac{AB}{2}[\cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t], \quad (1)$$

式中: A 和 B 分别表示原始信号和本征信号的幅度; ω_1 和 ω_2 分别表示原始信号和本征信号的频率。图1显示了混频器信号传递示意图,差频测量装置由本振振荡器输入、混频器和中频(IF)输出组成。本振振荡器产生振荡频率,信号频率和振荡频率通过混频器差频,产生中频。该中频频率相对于待测频率而言较低,易于用常规电子手段处理。IF信号经滤波和放大,获得特定频率的信号。噪声等效功率(NEP)能达到 $10^{-21} \sim 10^{-19} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1}$,频率测量灵敏度远高于直接探测。差频测量需要本振振荡器,从而增加了探测成本和复杂性,且不易集成为探测器阵列。

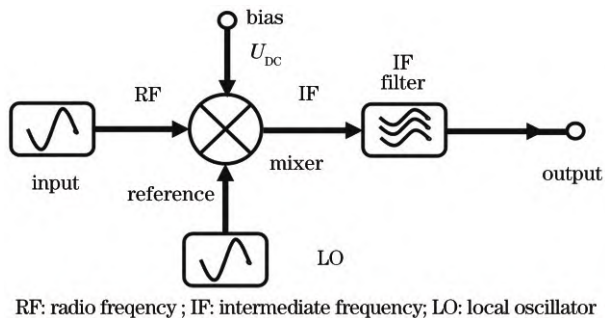


图1 混频器信号传递示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mixer signal transmission

2.1.2 太赫兹混频器分类

混频器作为一种非线性电子学元件,其检测方式分为非相干(直接)探测和相干(差频)探测两种。

非相干检测是借助检波器将检波信号直接转化为电流或电压幅度的检测。其动态范围宽、结构简单,适合于毫米到纳米波长电磁波的检测,可基于大规模阵列检测,但缺少相位信息,难以实现超高分辨率探测。检波器分为制冷型和非制冷型。制冷型检波器具有更高的灵敏度和更快的响应时间。非制冷型检波器具有中等灵敏度和较长响应时间。太赫兹非相干探测器主要应用于连续谱成像观测和宽频带中低分辨率谱线观测。

相干检测通常采用超外差结构,先将太赫兹信号变换到较低频段,再提取信号的幅度和相位。相干检

测系统,需要混频器等关键元器件,结构相对复杂,对混频器以及本振源输出功率和噪声提出了较高要求。由于相位信息可检,因而具有较高的分辨率。进行信号放大后可获得较高灵敏度,应用于高频率分辨率的分子和原子谱线观测。

太赫兹混频器分为肖特基(Schottky)二极管混频器、超导体-绝缘体-超导体(SIS)混频器以及热电子辐射热计(HEB)混频器三种形式。Schottky混频器以Schottky二极管为单元,工作在常温下,灵敏度较低;SIS混频器以超导结为基本组成单元,工作在低温下,可工作在毫米波和亚太赫兹波段;HEB混频器工作在1 THz以上的更高频段。

2.2 太赫兹混频器工作机理

2.2.1 Schottky混频器工作机理

1) Schottky二极管工作基本原理

Schottky势垒二极管以金属为正极,以N型半导体为负极,二者接触,在面上形成的势垒具有整流特性,可制成金属-半导体器件,称为金-半接触二极管或者表面势垒二极管。本质上Schottky是热载流子二极管,具有恢复时间短(纳秒量级)的特点。N型半导体中电子多,金属中电子少,电子由浓度高的半导体向浓度低的金属扩散。随着电子不断从半导体扩散到金属,半导体表面电子浓度逐渐降低,表面形成势垒,其电场方向为半导体→金属。在该电场作用下,金属中的电子也会产生从金属→半导体的漂移运动,从而削弱由于扩散运动而形成的电场。当建立起一定宽度的空间电荷区后,电场引起的电子漂移运动和浓度不同引起的电子扩散运动达到相对平衡,便形成了Schottky势垒。

图2显示了Schottky势垒二极管的剖面结构示意图。如在Schottky势垒两端加正向偏压(阳极金属-电源正极,N型半导体-电源负极)时,势垒层变窄,内阻变小;反之,如势垒两端加反向偏压,势垒层变宽,内阻变大,呈现单向导通性能。

2) Schottky次谐波混频器工作原理

基波混频所需的本振频率与射频频率相同,在太赫兹波段高频振荡器的稳定性有待提高,难以实现很好的输出,而次谐波混频所需的本振频率仅为射频的一半,工艺上低频本振结构比太赫兹波段本振结构更容易获得,因此次谐波混频器成为太赫兹频段混频主流方式之一。基于反向并联Schottky二极管对可实现次谐波混频。

如图3所示,假设进入每个二极管电流分别为 i_1 和 i_2 ,推导可得进入双二极管的电流^[4]为

$$i = i_1 + i_2 = I_{s0}(e^{av} + e^{-av}) = I_{s0}sh(av), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} i = & A_1 \cos \omega_{LO} t + A_2 \cos \omega_s t + A_3 \cos 3 \omega_s t + \\ & A_4 \cos 5 \omega_{LO} t + A_5 \cos (2 \omega_{LO} + \omega_s) t + \\ & A_6 \cos (2 \omega_{LO} - \omega_s) t + A_7 \cos (4 \omega_{LO} + \omega_s) t + \\ & A_8 \cos (4 \omega_{LO} - \omega_s) t + \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

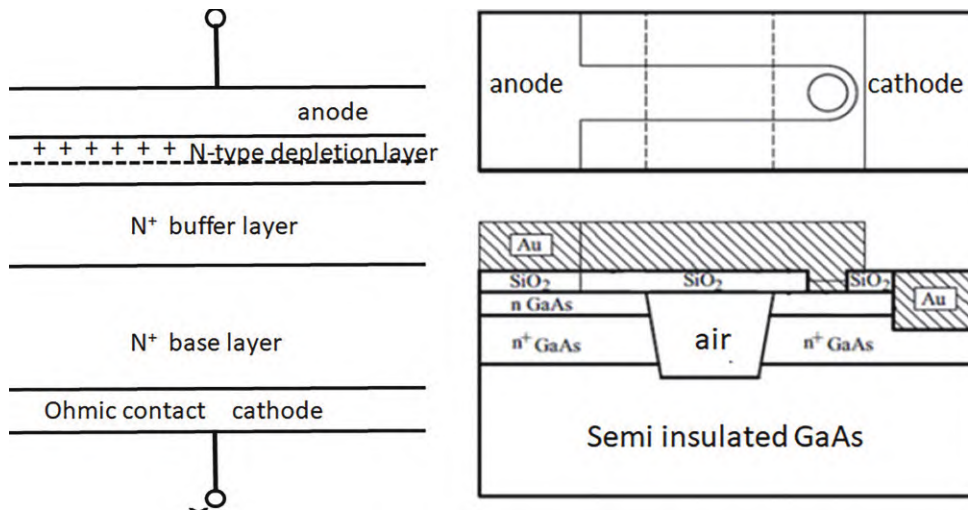


图 2 Schottky 势垒二极管结构图(左图)^[1]和平面 Schottky 二极管结构图(右图)^[2]
Fig. 2 Schottky barrier diode structure (left)^[1] and planar Schottky diode structure (right)^[2]



图 3 谐波混频器原理图(左图)^[3]和 Schottky 反向并联二极管混频器俯视图(右图)^[2]
Fig. 3 Schematic diagram of harmonic mixer (left)^[3] and top view of Schottky inverse parallel diode mixer (right)^[2]

式中: $A_1, A_2, A_3 \dots$ 为常量; ω_{LO}, ω_s 分别为本征频率和射频信号频率。总电流包括本振信号的偶次谐波分量与射频信号分量, 次谐波对应 $(2\omega_{LO} + \omega_s)$ 和 $(\omega_s - 2\omega_{LO})$ 两个分量。混频过程就是将两个不同频率的信号分解为两者的和频信号和差频信号。通过本征信号与信号的偶次谐波混频, 可以获得所需的中频信号。

2.2.2 SIS 混频器工作机理

超导隧道结由两片微米级超导薄层和一层纳米级超薄势垒层构成, 具有能隙以下极低暗电流和超强非线性伏安特性两大特点。超导隧道结混频器可提供较高

的变频效率, 同时它所需要的本振功率较小, 因此噪声较低。超导隧道结混频器可将极微弱的被探测信号与本振信号进行外差混频、放大和频谱处理, 其灵敏度接近测不准原理所制约的量子噪声极限。SIS 混频器是采用超导材料/绝缘材料/超导材料组成的三明治结构器件, 工作频率与带隙相关, 常用的 Nb 超导隧道结工作频率在 700 GHz 处, 而高能隙超导材料 NbN 以及 NbTiN 等工作频率在 1 THz 以上。目前, 超导隧道结混频器的研究由 SIS 结单元向大规模多像素集成化方向发展。

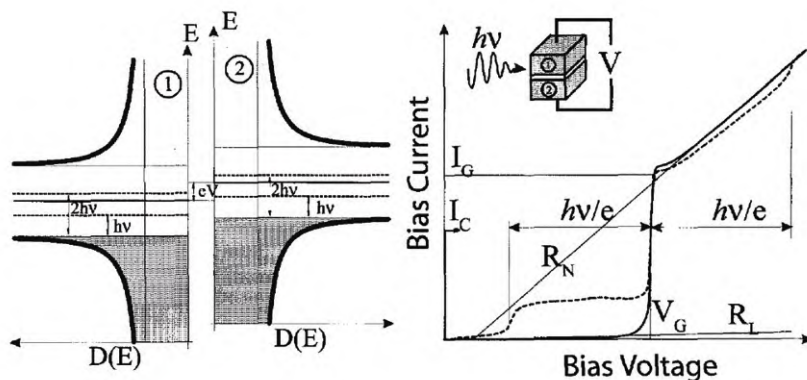


图 4 SIS 结的能带图(左图)和 $I-V$ 曲线(右图)^[5]
Fig. 4 Energy band diagram (left) and $I-V$ curve (right) of SIS junction^[5]

图 4 显示了 SIS 结的能带图和 I - V 曲线, SIS 结的典型几何形状显示在插图中。虚线是施加亚毫米辐射时 SIS 结的 I - V 曲线^[5]。在 SIS 混频器中,超流过程得到抑制,准粒子隧道过程占主导,在外加电压 $|eV| < 2\Delta$ 时,两个超导态区交叠,没有显著的准粒子电流通过势垒,在偏压 $|eV| = 2\Delta$ 时(即等于带隙电压 V_G 时),超导 1 材料的自由区与超导 2 材料的占区相平齐,电子可以直接穿透势垒。由于超导带隙边缘的态密度无限大, SIS 结的 I - V 特性非线性在偏压 V_G 处非常大,随着偏置电压的变大,电流 I 陡然增大到 I_G 。当偏压大于带隙电压 V_G 时, SIS 结表现出金属电阻特性。

图 5 显示了 SIS 混频器 IF/DC 信号连接的典型方案。混频器信号经过偏压、低温放大、滤波,得到高灵敏的 IF 信号,最终被检测。

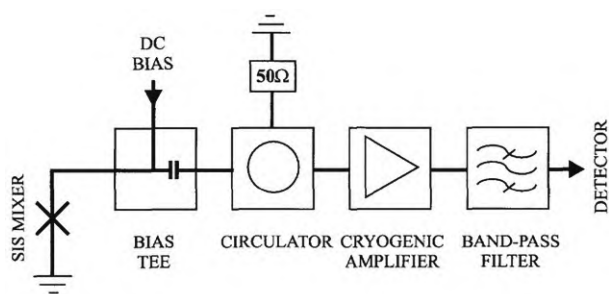


图 5 SIS 混频器 IF/DC 信号连接的典型方案^[5]

Fig. 5 Typical scheme of IF/DC signal connection for SIS mixer^[5]

SIS 混频器是基于光子辅助的隧道过程,利用了混频器的 SIS 结 I - V 特性的非线性特性,从而表现出优良的性能(转换效率接近 1,噪声温度接近量子极限, T_n 为 50~170 K)。然而,工作截止频率受限于超导体间隙频率($f_c < \Delta/h$)。对于铌来说, f_c 大约是 700 GHz,对于 NbN 来说,略高于 1 THz^[6]。要获得高于 1 THz 超灵敏探测,需要探索更新材料体系探测器或者 HEB 混频器等技术。

2.2.3 HEB 混频器机制与模型

1) HEB 混频器非辐射热过程讨论

图 6 显示了 94 K 温度下混合信号强度的中频依赖性。94 GHz 信号波和 LO 波同时照射到器件上。实心三角形和虚线曲线分别表示实验值和使用双温度模型的理论值^[7]。2002 年,日本国防学院 Uchida 等^[8]基于 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 高温超导,开展了 94 GHz 毫米波辐射的槽形天线耦合性能研究,研制出毫米波频段 HEB。研究发现,超外差混频信号强度响应属于非辐射热过程(由磁通蠕变效应主导),其输出中频带宽(1 GHz)比辐射热过程(由声子-逃逸机制主导)带宽(250 MHz)要宽。他们认为,非辐射热过程中较宽的中频带宽由微桥中涡流的运动导致,并取决于偏置电流和外部磁场的强度等因素。

2) HEB 混频器高灵敏度机制

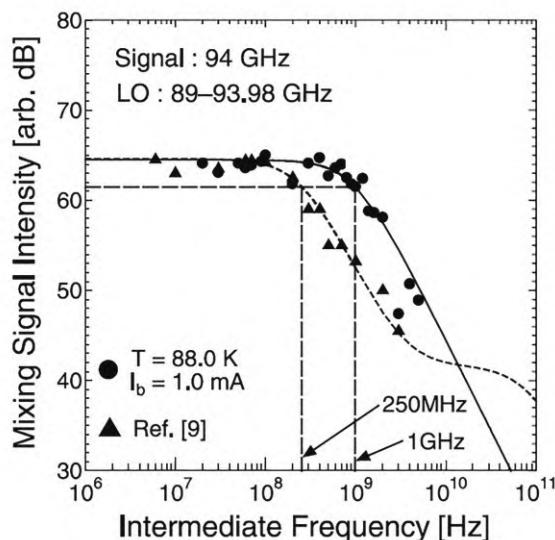


图 6 94 K 温度下混合信号强度的 IF 依赖性^[7]

Fig. 6 IF dependence of mixed signal intensity at temperature of 94 K^[7]

钱学森空间科技实验室 Zhang 等^[9]的研究表明,高灵敏度的超导热电子探测器的性能与超导材料的能量弛豫过程有着内在的联系,其主要受电子-声子非弹性散射和声子-逸出相互作用的制约。特别是,无序的低温超导材料的能量弛豫时间主要取决于准粒子非弹性散射机制^[10]。中国科学院上海微系统与信息技术研究所张露等^[11]的研究表明,在低温超导 NdN 体系中,电子-声子非弹性散射机制是该类超导体形成器件高灵敏探测的主导机制,实验证明,准粒子散射弛豫时间取决于磁场、温度、薄膜的厚度及无序程度。研究获得 12 ps 准粒子散射弛豫时间,为制备超灵敏探测器提供理论和实验支撑。

以上研究都显示了超导热电子探测器性能与电声子非弹性散射的关联性,且与能量弛豫时间有关。不同之处在于,Zhang 等基于纳米线获得热电子探测灵敏度与能量弛豫过程关联的证据,而张露等则基于薄膜材料在实验上证明了准粒子散射弛豫时间与磁场、温度、薄膜的厚度和无序度的关系。

3) HEB 混频器热点模型

南京林业大学 Jiang 和日本东京大学 Shiino 等^[12]联合开展了 0.8 THz 和 1.5 THz 波导 HEB 混频器研究。基于原位制造技术制备了 0.8 THz 和 1.5 THz 波导 NbTiN HEB 混频器。NbTiN HEB 混频器中 NbTiN 薄膜(10.8 nm)的宽度为 1.00~1.50 μm ,长度为 0.15~0.20 μm 。在 0.8 THz 和 1.5 THz 的情况下,最低接收器噪声温度为 210 K。采用了一个优化的热点模型,通过将声子冷却和扩散冷却机制结合,可提高波导 NbTiN 基 HEB 混频器的性能。在 0.8 THz 和 1.5 THz 时,建模的最低本征混频器噪声温度分别为 85 K 和 100 K。研究发现,中频增益带宽对微桥长度

相当敏感,因此可通过调节微桥长度来调节混频器带宽。

中国科学院紫金山天文台 Miao 等^[13]研究了超导微桥的太赫兹波吸收机制和超导 HEB 混频器性能与工作温度的相关性。通过引入太赫兹辐射的非均匀吸收概念,构建了超导 HEB 混频器的频率相关热点模型,模拟仿真的超导 HEB 热电子混频器在不同频率及功率光子吸收情况下的直流和高频特性与实测结果吻合得很好,为 HEB 混频器的研究提供模型和实验参考。

Zhang 等^[14]认为,辐射热计中的电阻行为由正常的热点模型主导,其长度随着耗散量的增加而增加^[15]。辐射热计的电阻来自具有一定长度的正常域,其电阻率与温度无关^[16]。这个正常域被夹在超导域之间。在这种情况下,出现了一个 SNS 结构。此外,正常域的长度在 f_{IF} 下被信号和 LO 调制,在器件上引起一个交流电压。此时简单的热点模型不能描述低偏置电压下的 I -

V 特性,需要引入与温度有关的局部电阻率模型加以解释。超导 HEB 混频器向更高的工作频率、更高的灵敏度、更高的工作温度和更大的中频带宽方向发展。

2.3 Schottky 混频器技术路线

作为 Schottky 混频器的核心组成单元, Schottky 二极管通过反向并联等方式可构成混频器。在介绍国内外技术研究进展前,先介绍 Schottky 二极管的设计与制作工艺。

2.3.1 Schottky 二极管设计

图 7 为 Schottky 二极管等效电路模型^[17]。包括衬底和欧姆接触区的趋肤电阻 R_{sp} 和欧姆接触电阻 R_c 、外延层电感 L_s 、直流扩散电阻 R_s 和位移电容 C_s , Schottky 结区的结区电容 C_e 、二极管参数经测量得到(图 8)。基于该等效电路模型可借助于 ADS 等软件实现电路性能仿真。

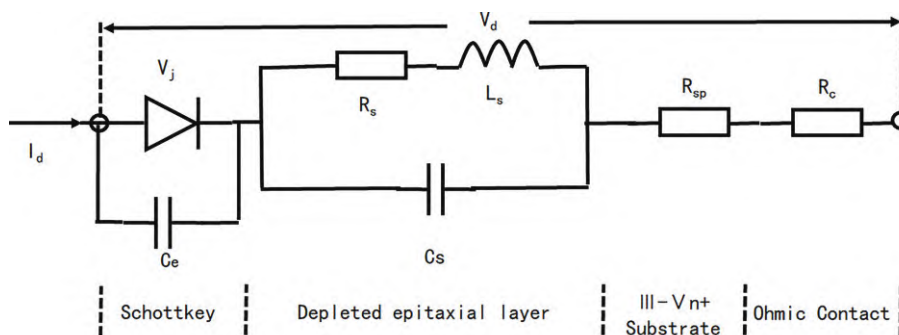


图 7 Schottky 二极管等效模型^[17]

Fig. 7 Schottky diode equivalent model^[17]

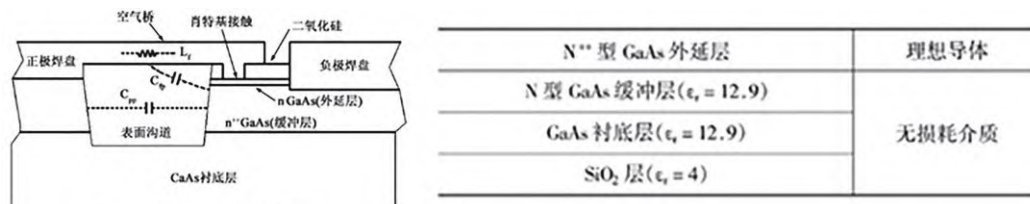


图 8 Schottky 二极管结构与寄生参数(左图)和二极管材料参数(右图)^[18]

Fig. 8 Schottky diode structure in terms of parasitic parameters (left) and diode material parameters (right)^[18]

中国科学院空间科学与应用研究中心赵鑫等^[19]基于 HFSS 仿真软件,开展了二极管材料和封装建模,将二极管放置在一段悬置微带中,把两个 Schottky 结作为集总端口,得到二极管管芯的理想单边带变频损耗为 6.0 dB,再考虑二极管封装、设计匹配电路,得到混频器的仿真损耗为 8.0 dB,设计本征功率为 4 mW。混频器的测试损耗为 14.0 dB,本征功率为 5 mW。

2.3.2 Schottky 二极管制作工艺

图 9 显示了 InP 基 Schottky 二极管侧面结构。Schottky 势垒二极管制备工艺通常包括:1)选择高电导率的 N 型(N⁺)材料为衬底,如 InP 衬底;2)生长高纯度的高电导率 N⁺缓冲外延层 N⁺InGaAs;3)生长外延层(如 N-InGaAs)以连接到金属阳极形成整流结;

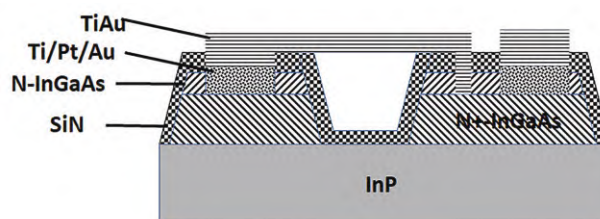


图 9 InP 基 Schottky 二极管结构

Fig. 9 Structure of InP based Schottky diode

4)在衬底上生长欧姆接触层,通常采用 Ti/Pt/Au 多层薄膜作为欧姆接触层;5)制作空气桥与阴极和阳极焊盘(蒸镀 TiAu 金属层)。Schottky 二极管缓冲层应尽量采用高掺杂,由 GaAs 材料制作的缓冲层掺杂浓度

数量级应为 $10^{18}/\text{cm}^3$ 。相对于缓冲层,通常 Schottky 二极管的外延层掺杂浓度应低 1~2 个数量级。

2.3.3 Schottky 混频器技术发展

1975 年, Cohn 等^[20-21]提出基于反向并联二极管对实现谐波混频,此后谐波混频器的设计方法不断更新。20 世纪 80 年代末,半导体技术和单片集成技术发展迅速,为谐波混频器研究朝着微波单片集成电路(MMIC)芯片微型化集成化方向发展提供技术支撑。

2007 年,英国 Marsh 等^[22]基于商用 UMS 的 DBES105a 二极管加工了 183 GHz 的固定调谐分谐波混频器。采用上下腔,结构紧凑。测试得到本振信号频率为 92 GHz、本振功率为 5 mW 时,混频器的双边带变频损耗为 6.85 dB,噪声温度为 988 K。2010 年,英国 Leeds 大学 Wilkinson 等^[23]报道了 664 GHz 分谐波混频器。该分谐波混频器在 4.2 mW 的本振功率下,变频损耗最优仿真结果为 8 dB,在 650~690 GHz 的射频范围内变频损耗为 10 dB。2012 年,美国 Thomas 等^[24]研制了单片集成的次谐波混频器,其频率为 1.2 THz,本振功率为 1~1.5 mW。测试结果表明,在频率 1130~1220 GHz 范围内双边带变频损耗优于 15 dB,双边带噪声温度低于 6000 K。这几项研究覆盖了 500 GHz~1.2 THz 波段的研究,噪声温度相比 SIS 和 HEB 混频器要高 1~2 个数量级,但由于 Schottky 混频器工作在常温下,采用合适信噪比实现变频,具有较好的应用市场。

作为国际上开展单片集成工艺技术研究的代表性公司,美国弗吉尼亚二极管公司(VDI)^[25]2013 年基于平面 Schottky 二极管工艺,研制出太赫兹低损耗宽带谐波混频器,截止频率为 2 THz,并应用在锁相太赫兹量子级联激光器(THz QCLs)系统中。三次谐波混频转换损耗为 27 dB,四次谐波混频转换损耗为 30 dB,达到当时世界领先水平。

日本的 Fujiwara 等^[26]2019 年设计的 W 波段混频器在射频频率为 88~90 GHz、LO 频率为 37 GHz、功率为 15 dBm 时的变频损耗为 9~16 dB。

爱尔兰著名毫米波企业 Farran 公司^[27]2021 年基于平面 Schottky 二极管工艺,开发出基波(RF-LO)、次谐波(RF-2xLO)和谐波混频器(RF-NxLO,其中 N=2、4、6),产品工作频段覆盖 26.5 GHz 到 500 GHz。WHMB-12(E 波段六次谐波混频器)在本振为 10~15 GHz 时的最大变频损耗为 32 dB;WHMB-10(W 波段八次谐波混频器)在本振为 9.38~13.75 GHz 时的变频损耗为 30 dB。

目前,国际上主流技术为单片集成工艺。虽然该技术对器件性能、工艺安装条件及工艺线等要求极为苛刻,但降低了混频器所需的驱动功率,功耗低。由表 1 可见,随着工作频率的增高本征功率变小。相比 SIS 和 HEB 混频器, Schottky 混频器的温度噪声较高,但 Schottky 混频器普遍应用于常温下,不需要低温附属设备,具有体积小、结构灵活的优点。

表 1 国外基于 Schottky 二极管的谐波混频器性能比较

Table 1 Performance comparison of foreign harmonic mixers based on Schottky diode

RF band /GHz	Frequency conversion loss /dB	LO power /mW	Noise temperature /K	Harmonic number	Year	Author (company) & country	Reference
183	6.85	5	988	Second	2007	Steve Marsh, UK	[22]
650-690	8	4.2	1500	Second	2010	Paul Wilkinson, UK	[23]
1130-1220	15	1-1.5	6000	Second	2012	Bertrand Thomas, UK	[24]
1900-2800	30	1	—	Second	2013	VDI, USA	[25]
88-90	9-16	15	—	Second	2019	Kohei Fujiwara, Japan	[26]
75-110	9	20	—	Second	2021	Farran, Ireland	[27]

近年来,中国在 Schottky 二极管混频器方面发展迅速。东南大学、南京理工大学、成都电子科技大学、南京信息工程大学等单位均开展了基于 Schottky 二极

管的谐波混频器研究,并取得一系列可喜成果^[28-32],性能见表 2。

表 2 国内基于 Schottky 二极管的谐波混频器性能比较

Table 2 Performance comparison of domestic harmonic mixers based on Schottky diode

RF band /GHz	Local power /dBm	Frequency conversion loss /dB	Diode type	Harmonic number	Year	Reference
90-100	13	8-13	DMK2308	Second	2013	[28]
82-94	12.5	12-14	R23C15	Fourth	2015	[29]
91-97	19	11-18	MA4E1310	Second	2019	[30]
560-600	5	11.5	DBES105a	Second	2020	[31]
94	10	9-14	DMK2308	Second	2021	[32]

由于 Schottky 二极管自身的电压电流非线性关系及不依赖超导转变温度条件限制,具有可工作于室温、工作带宽较宽、速度快等特点,成为当前重要的太赫兹混频器之一^[33]。Schottky 二极管太赫兹混频技术将朝着低温度噪声、低变频损耗、高工作频率、单片集成等方向发展。

2.4 SIS 混频器技术路线

两个不同频率的信号作用于非线性器件,变换后,电流中包含直流分量、基波、谐波、和频、差频分量等。其中,差频是所需要成分,混频就是通过带通滤波器过滤不需要的频率分量,取出差频分量的过程。SIS 器件具有良好的非线性,是天然的混频器件。SIS 混频

器可借助于 SIS 的非线性特性获得差频。

2.4.1 SIS 混频器设计

澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)Gao 等^[34]提出了全单片集成的高温超导(HTS)约瑟夫森结 THz 谐波混频器与圆极化(CP)天线耦合的新设计(图 10)。该全片式混频器装置尺寸非常紧凑,利用 CP 天线来增强太赫兹辐射耦合中极化方向的灵活性。基于电磁(EM)模拟优化太赫兹 CP 天线的耦合效率、轴向比率、单片机的信号传输和隔离特性,建立了 HTS 太赫兹混频器的等效电路模型,对阶梯边缘约瑟夫森结的特性进行仿真。结果表明,单片式 HTS 混频器性能优于当时已报道的任何 HTS THz 谐波混频。

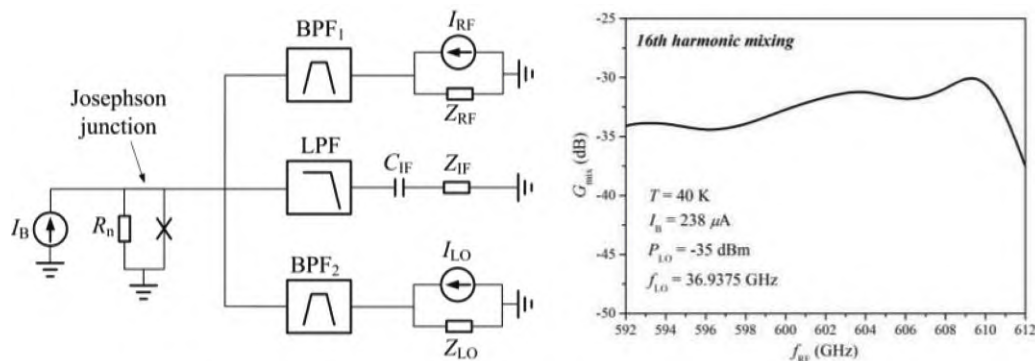


图 10 单片集成 HTS THz 混频器等效电路(左图)和 HTS THz 混频器频率响应仿真(右图)^[34]

Fig. 10 Monolithic integrated HTS THz mixer equivalent circuit (left) and HTS THz mixer frequency response simulation (right)^[34]

澳大利亚 CSIRO 的 Zhang 等^[35]报道了 Ka 波段 HTS MMIC 约瑟夫森结混频器的建模和仿真结果(图 11)。基于 ADS 软件,建立了约瑟夫森结的 Verilog-A 模型,并将其导入系统仿真器,以实现包含

HTS 无源电路模型的完整 HTS MMIC 电路仿真。研究了结与无源器件之间的阻抗匹配优化。仿真了结的直流 I - V 特性、电流和本振振荡器偏置条件以及混合性能,仿真与实验结果一致。

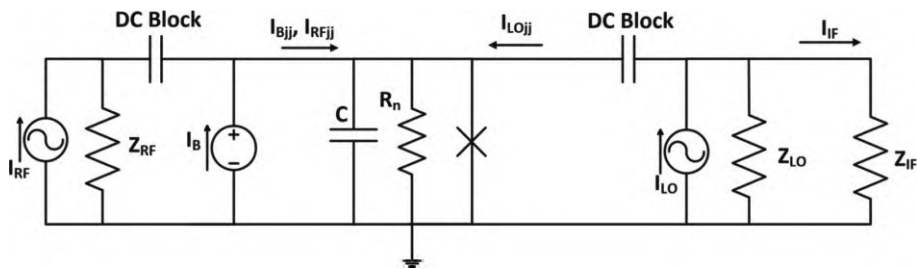


图 11 约瑟夫森结仿真等效电路^[35]

Fig. 11 Josephson junction simulation equivalent circuit^[35]

2010 年,南京信息职业技术学院和南京大学的张照锋和许伟伟等^[36]采用准光技术,基于 SIS 超导结的约瑟夫森效应,设计了频率为 500 GHz 的超导混频器(图 12)。提出对数周期天线的设计方案,计算了天线的阻抗和 SIS 结的阻抗,并设计了 $\lambda/4$ 微带线阻抗变换器,实现了天线和 SIS 超导结的阻抗匹配。最后,基于 HFSS 软件仿真验证,为 SIS 超导接收机的构建奠定了基础。

2.4.2 SIS 混频器制造工艺

双结 SIS 工艺流程(图 13):荷兰 SRON 国家空间

研究所 Jackson 等^[37]在熔融 Si 衬底上生长界面层 20 nm 厚的 AlN,再生长 300 nm 厚的 NbTiN,光刻形成图形,生长铌 SIS 结,再生长 250 nm 厚的 SiO_2 ,阳极化,生长 400 nm 的 Al 布线层,最后覆盖 200 nm 的 SiO_2 。 $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ 用于 Nb 结点电极的反应性离子蚀刻,以改善蚀刻的各向异性和可重复性。 O_2 等离子体蚀刻光刻胶图案。采用接触式紫外光刻,射频磁控溅射沉积 SiO_2 电介质和钝化层,直流磁控溅射沉积 Nb、NbTiN 和 Al 层。

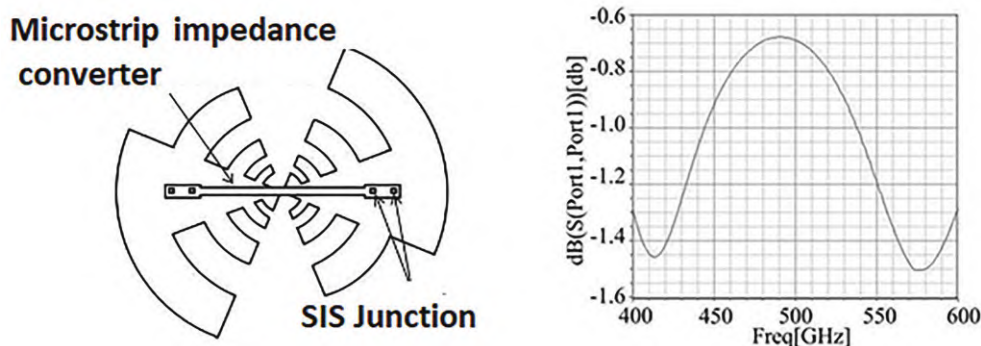


图 12 集成天线、微带阻抗变换器、超导结的 SIS 混频器示意图(左图)和天线与 SIS 结直接耦合时的 S_{11} 曲线(右图)^[36]

Fig. 12 Schematic diagram of SIS mixer with integrated antenna, microstrip impedance converter, and superconducting junction (left) and S_{11} curve for direct coupling of antenna and SIS junction (right)^[36]

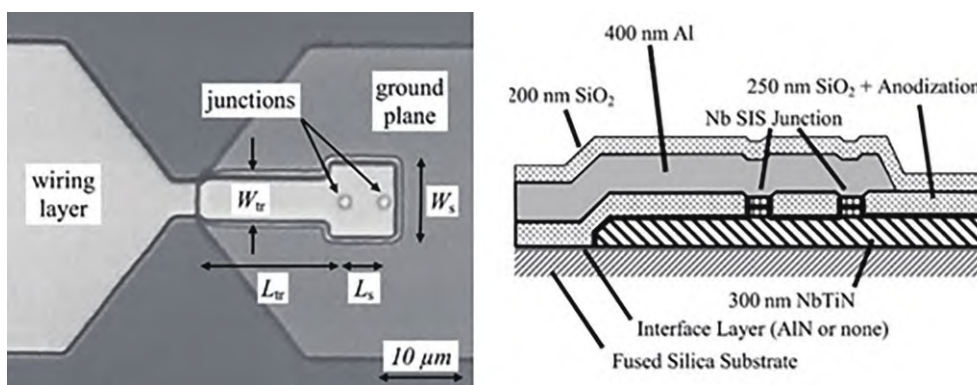


图 13 双结 SIS 调谐电路的几何形状^[37]

Fig. 13 Geometry of double junction SIS tuned circuit^[37]

2.4.3 SIS 混频器技术发展

1957 年,日本的江崎玲于奈(Leo Esaki)在研制新型高频晶体管时,发现了高掺杂、窄 PN 结的正向伏安特性中异常的负阻现象。他认为是由电子空穴直接穿透结区形成,并于 1958 年在实验上观察到隧道效应,开发出半导体隧道二极管,又称江崎二极管,因此于 1973 年获得诺贝尔物理学奖^[38]。20 世纪 60 年代挪威的 Giaever^[39]基于薄膜技术发现了超导体中的准粒子隧穿效应,制成了超导体-绝缘体-金属(SIN)和超导体-绝缘体-超导体(SIS)准粒子器件,又称单粒子隧道器件。基于该效应,他成功测量到超导能谱结构,验证了超导能隙的存在。1979 年, Tucker^[40]基于全量子隧道理论计算了作为三端口混频器运行的理想 SIS 结的性能,预测了一种具有大转换增益的静态混频器($T_M - h\nu/k$)。表明 SIS 准粒子外差接收器噪声温度可以达到光子噪声极限。1980 年,加利福尼亚大学的 Shen 等^[41]报道了超导体-绝缘体-超导体隧道结中外差混合的观察结果,具有显著的转换增益,噪声温度与光子噪声极限相当,观测到的增益与 Tucker 的计算结果在数量上吻合良好,36 GHz 频率下双边带混频器最佳转换增益为 1.4,噪声为 1.5 K。随着集成工艺水平的提升,铌基超导隧道结制备能力显著提高,太赫兹波段超导隧道结混频器技术得到加速发展,推动了一系列器

件技术进步与天文科学发现。

1) 基于微带调谐电路和 SIS 结对集成的低噪声温度 SIS 混频器

2006 年,荷兰 SRON 国家空间研究所 Jackson 团队^[37]集成 NbTiN-SiO₂-Al 微带调谐电路和一对平行的“标准”1 μm^2 Nb/Al-AlO_x/Nb SIS 结,开发出 0.80~1.12 THz 范围内的低噪声混频器,在 0.80~0.96 THz 和 0.96~1.12 THz 波段获得了低接收器噪声温度(小于 300 K),该技术应用于欧洲航天局的赫歇尔空间观测站高分分辨率的外差分光谱仪 HIFI 中。

2) 低噪声温度 SIS 准粒子混频器

加利福尼亚大学 Taur 团队^[42]用 Nb-Nb 点接触约瑟夫森结制作了 36 GHz 微波的混频器,转换效率大于 1,测量结果与电阻性分流结模型的预测一致。Shen 等^[41]利用 SIS 隧道结的准粒子 $I-V$ 曲线的非线性特性,制造出具有与量子极限相当的噪声温度的毫米波长的外差混频器。当非线性电压范围远小于 $\hbar\omega/e$ 时,经典器件理论失效,混频器的工作机制遵循光子辅助隧道理论。

3) 基于 NbN/AlN/NbN 高电流密度隧道结的准光学 SIS 超外差混频器

1996 年,日本邮电部通信研究实验室关西高级研究中心的 Wang 等^[43]基于 NbN/AlN/NbN 高电流密度

隧道结研制出低噪声外差混频, 结直径为 $1\ \mu\text{m}$, 电流密度约为 $20\ \text{kA}/\text{cm}^2$ (图 14)。混频器包含了透镜耦合对数周期天线和集成调谐电路。集成调谐电路包含径向短截线调谐器, 用于谐振出结电容。该隧道结具有良好的直流 I - V 特性、优异的亚毫米波响应和灵敏的

外差混合响应。从 $254\ \text{GHz}$ 到 $350\ \text{GHz}$, 使用标准 Y 因子方法测量的平均接收器噪声温度约为 $250\ \text{K}$ 双边带 (DSB)。在 $303\ \text{GHz}$ 左右获得的最低的接收器噪声温度为 $200\ \text{K}$ (DSB)。

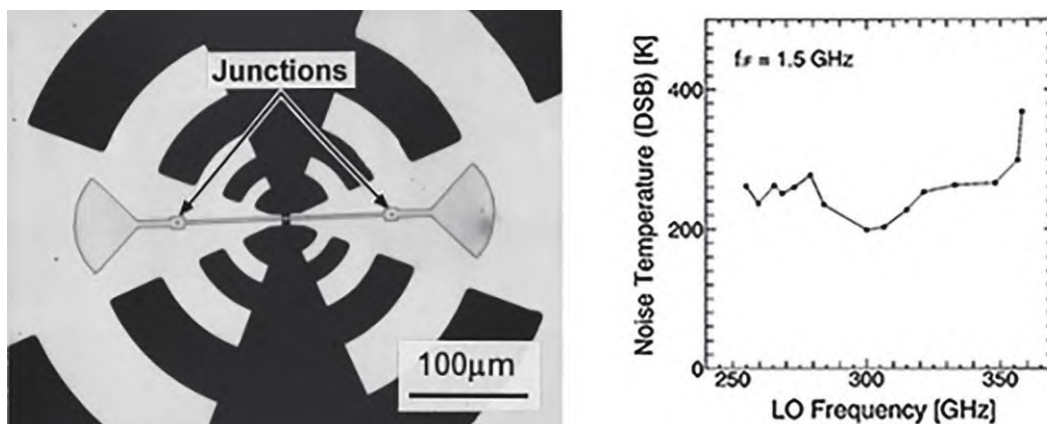


图 14 带有集成调制电路的 NbN/AlN/NbN 混频器光学显微照片 (左图) 和 DSB 噪声温度随 LO 频率变化关系 (右图)^[43]

Fig. 14 Optical micrograph of NbN/AlN/NbN mixer with integrated tuning circuits (left) and DSB noise temperature as a function of LO frequency (right)^[43]

4) 硅片级共面波导与平衡 SIS 混频器和天线接收机集成工艺

德国科隆大学的 Westig 团队^[44]基于硅衬底研制出一种 $380\sim 520\ \text{GHz}$ 平衡 SIS 混频器。所有的射频 (RF) 电路元件制作于 $9\ \mu\text{m}$ 厚的膜上, 中频被单独放大和组合。使用 Nb/Al/Al₂O₃/Nb SIS 结的平衡混频器芯片, 安装在碲铜波导块中。在 $440\sim 495\ \text{GHz}$ 的射频和 $4\sim 8\ \text{GHz}$ 的中频带宽内, 测量到最低接收器双边带噪声温度为 $70\ \text{K}$, 噪声抑制制度高达 $18\ \text{dB}$, 代表了先进的器件性能。

图 15(a) 显示了晶圆上的平衡混频器。锥形槽线波导天线连接到 90° 共面波导 (CPW) 支线耦合器上, 耦合器放大图见图 15(b), 为两对 SIS 结提供能量。SIS 结放大图见图 15(c)。每个结对都连接到一个单独的射频阻断滤波器。梁式引线触点提供接地和信号

连接, 并将设备悬挂在混频器块内 [图 16(a)]。在图 15(c) 中, 交变线变压器用一个方框表示, 在这个方框中指定了电路的导纳值 Y 。阻抗为 Z_3 的部分是用倒置的微带传输线实现的, 而阻抗为 Z_0 和 Z_4 的部分是 CPW 传输线。阻抗为 Z_{ms} 的微带线是 $1/4$ 波变压器的输入部分, 是 SIS 结调谐电路的一部分。为制备低噪声温度双倍频带混频器提供设计借鉴。

图 16(a) 显示了一个安装在波导混频器模块内的平衡混频器装置。图 16(b) 显示了实验装置的方案和平衡混频器的信号路径图。矩形代表校准黑体 T_h ($295\ \text{K}$) 和 T_c ($77\ \text{K}$)。箭头分别表示 RF、LO 和 IF 的相位^[44]。

5) 用于天文观测的 $0.5\ \text{THz}$ 全 NbN 低噪声 SIS 混频器

中国科学院紫金山天文台李婧与日本国家情报通信研究所 (NICT) Wang 等^[45]在低噪声 NdN 基混频器方面做出特色工作。2008 年, 该团队基于 NbN/AlN/NbN 隧道结和 NbN/MgO/NbN 调谐电路开发出 $0.5\ \text{THz}$ 低噪声全 NdN 型 SIS 混频器, 并成功应用于 $30\ \text{cm}$ 亚毫米望远镜进行 CO 谱线检测。在 $0.45\sim 0.50\ \text{THz}$ 的范围内, 在望远镜上测量到低至 $149\ \text{K}$ 的未校正接收器噪声温度, 如图 17 所示。与 $0.5\ \text{THz}$ 全铌混频器相比, 所报道的 $0.5\ \text{THz}$ 全氮化铌混频器在相当大的直流偏置范围内具有更高的稳定性, 在相当高的温度下具有更低的噪声。

6) 平面集成毫米尺寸紧凑型 SIS 混频器阵列接收器

2018 年, 日本国家天文台 Shan 和中国科学院紫金山天文台 Liu^[46]联合在 SIS 混频器方面开展了研究。

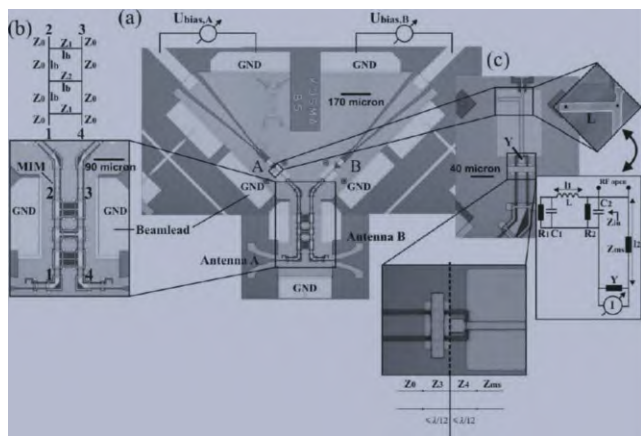


图 15 晶圆上的平衡混频器^[44]

Fig. 15 Balanced mixer on wafer^[44]

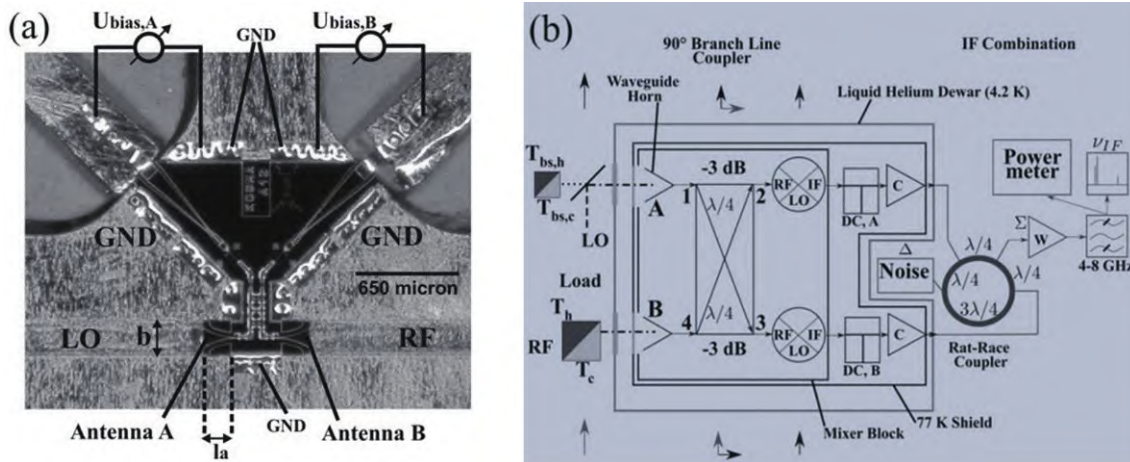


图 16 平衡混频器装置示意图。(a)波导混频器模块内的平衡混频器装置;(b)平衡混频器的信号路径图^[44]

Fig. 16 Diagram of balanced mixer device. (a) Balanced mixer device within waveguide mixer module; (b) signal path diagram of balanced mixer^[44]

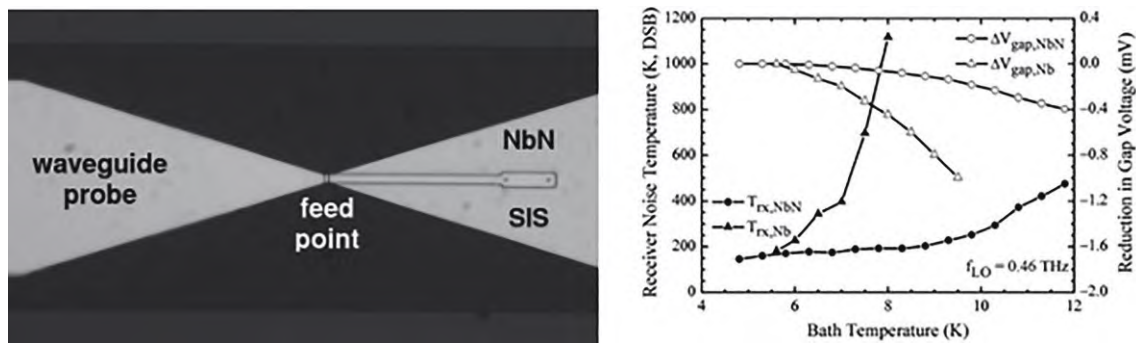


图 17 0.5 THz 全 NbN 基 SIS 混频器芯片光学显微照片(左图)和 SIS 混频器接收机噪声温度和间隙电压的降低随浴温变化关系(右图)^[45]

Fig. 17 Optical micrograph of 0.5 THz all-NbN SIS mixer chip part (left) and receiver noise temperature and reduction in gap voltage versus bath temperature for SIS mixers (right)^[45]

引入波导 SIS 混频器阵列接收器前端的平面集成的设计概念。建立一个毫米级的外形非常紧凑的焦距阵列接收器。与传统的基于单光束模块构件的 SIS 混频器阵列相比,由于其高度集成,平面集成阵列具有更高的可靠性,平面集成工艺可将双极化、平衡混合和边带分离集成于非常紧凑的外差式阵列接收器前端。所研制的单像素的原型接收器验证了概念的可行性。

2019 年,Shan^[47]基于单片式平面集成工艺,研制出 2 mm 波长双极化平衡 SIS 混频器(图 18)。平面正模换能器和 LO 耦合器通过使用局部形成的硅膜来实现。通过使用在绝缘体上局部形成的硅膜来实现平衡混频器的性能。在整个射频波段(125~163 GHz),平衡混频器显示了 LO 噪声抑制率约为 15 dB,整体接收噪声约为 40 K,交叉偏振小于 -20 dB。展示的紧凑性和集成电路的性能,证明该方法可用于开发外差法焦平面阵列。

7) 基于两个背对背单边鳍状线锥的 650 GHz 平衡 SIS 混频器

牛津大学 Tan 等^[48]基于两个背对背单边鳍状线锥

开展了 650 GHz 平衡 SIS 混频器的设计。采用了完全集成在 15 μm 绝缘体上的电路元件,在 635 GHz 下测量的最佳 DSB 噪声温度为 714 K,并在工作频段内保持在类似水平。

8) 中国首台 100 GHz、500 GHz 超导 SIS 接收机和多谱线接收系统

中国科学院紫金山天文台史生才院士团队^[49]在基于低温超导器件的太赫兹高灵敏度微弱信号探测方面做出了代表性工作。该团队研制出我国首台 100 GHz 超导 SIS 接收机和多谱线接收系统,频带宽度为 85~115 GHz,应用于 13.7 m 毫米波天文观测,为银河系内分子云与恒星形成研究、行星状星云研究、恒星晚期演化研究提供基础支撑;研制出我国首台 500 GHz 频段小型化、移动式、低耗电 SIS 接收机和我国首台移动式亚毫米波望远镜,首次观测到亚毫米波段的星际分子谱线;该团队与日本 NICT 合作基于 NbN 超导隧道结研制出 500 GHz 频段超导混频器,噪声温度达到 70 K,在国际上首次应用于天文观测。

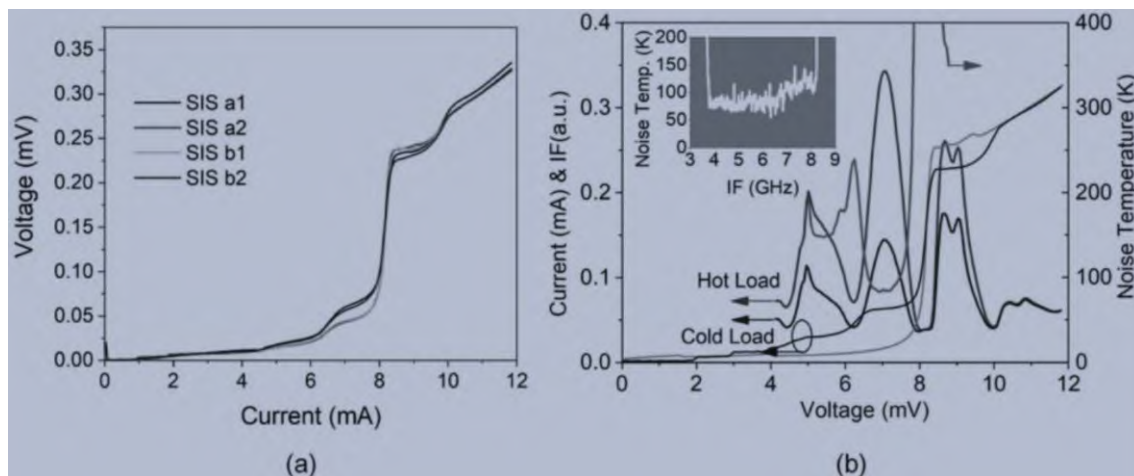


图 18 平衡 SIS 混频器的 I - V 曲线和噪声温度及 IF 特性。(a) 四个 SIS 结阵在 LO 为 133 GHz 时的泵浦 I - V 曲线;(b) 在 LO 为 155 GHz 时测量的噪声温度和中频随偏置电压变化关系^[47]

Fig. 18 I - V curve, noise temperature, and IF characteristics of balanced SIS mixer. (a) Pump I - V curves for four SIS junction array when LO is 133 GHz; (b) measured noise temperature and IF as a function of bias voltage when LO is 155 GHz^[47]

2.5 HEB 混频器技术路线

HEB 工作机制是基于电子和声子各自温度相异, 且处在平衡态的假设, 根据热平衡原理, 计算出电子和声子温度在 HEB 桥上的分布, 得出桥两端的电压值和器件 I - V 特性。HEB 混频器工作于最佳状态时对本征功率损耗要求极低(几十纳瓦), 可对 1 THz 以上的电磁辐射进行高灵敏度检测。

2.5.1 HEB 混频器设计

加利福尼亚大学的 Mor Nahum 借助金属中电子和声子在低温下的弱耦合提出了一种新型的天线耦合微辐射计。辐射由一个平面平版印刷的天线收集, 并在一个薄的金属带中热化。由此产生的电子温升被一个隧道结检测, 其中部分金属带形成了正常电极。平版印刷技术可方便地生产阵列。由于其体积小, 带材中的电子和声子之间存在热阻, 且带材和超导天线之间的界面上准粒子的反射, 导致热辐射计的活性区被热解耦。基于 $2\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m} \times 0.05\ \mu\text{m}$ 的金属体积在 $T=100\ \text{mK}$ 的操作温度下的设计得出 NEP 为 $3 \times 10^{-19}\ \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 时间常数为 $10\ \mu\text{s}$, 响应性为 $10^9\ \text{V/W}$ 。计算出的灵敏度比相同温度下运行的最好毫米和亚毫米辐射直接探测器高两个数量级^[50]。

图 19 为辐射耦合和温度读出配置示意图, 来自超导天线的射频电流在电阻性金属条(黑色条)中耗散, 由此产生的金属条中电子的温升, 最终被测结点上的电压变化显示。

2.5.2 HEB 制备工艺

超导 HEB 混频器的基本结构由一段超导微桥和两端的电极组成, 工作频率达到 1 THz。信号通过波导或者平面天线耦合到混频器, 通过外加直流使器件工作在电阻态。此时由于混频器的电子温度接近临界温度 T_c , 其电阻与温度呈强非线性关系。超导 HEB 混频器具有本振信号功率需求低的优点, 通常仅为几十

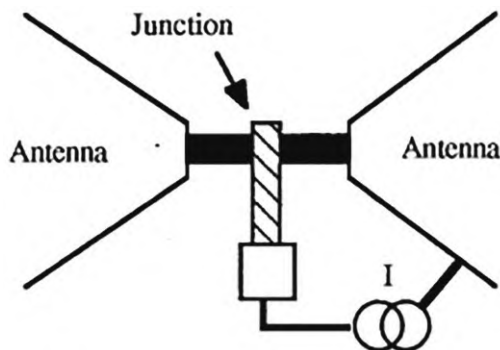


图 19 辐射耦合和温度读出示意图^[50]

Fig. 19 Schematic diagram of radiative coupling and temperature readout^[50]

纳瓦, 不存在能隙频率对工作频率的限制, 但有最大中频输出带宽限制, 理论上仅约为 6 GHz^[51]。

莫斯科国立师范大学的 Gol'tsman 等^[52] 1998 年公布了其 HEB 的制备工艺: 通过在 Ar+N₂ 混合气体中的反应式直流磁控溅射, 将超薄 NbN 薄膜沉积在蓝宝石、硅和晶体石英基片上, 薄膜为一个 $1\ \text{mm} \times 13\ \text{mm}$ 的辐射热计条, 横跨 Ti-Au 螺旋天线的中心间隙, 用光刻工艺制造准光学 HEB 混频器。其频率范围为 300~1250 GHz, 阻抗为 $75\ \Omega$ ^[53]。

2009 年, 南京大学王金平等^[54] 公布了其 HEB 制备方法。图 20 显示了 NbN 基 HEB 器件的显微照片和器件的剖面结构示意图。NbN HEB 由超导微桥和金薄膜天线构成。HEB 结构制备工艺包括: 1) 在 Si 衬底上溅射 5 nm 厚的 NbN 薄膜; 2) 光刻图形; 3) 溅射 6 nm 厚的 NdN 薄膜, 再蒸发 50 nm 厚的 Au 膜。超导微桥区尺寸为 $0.4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$, 使用电子束曝光 (EBL) 和反应离子刻蚀 (RIE) 技术实现。天线采用平面等角螺旋结构, 由 250 nm 厚的金薄膜层构成, 用光刻和剥离工艺技术实现天线制备。

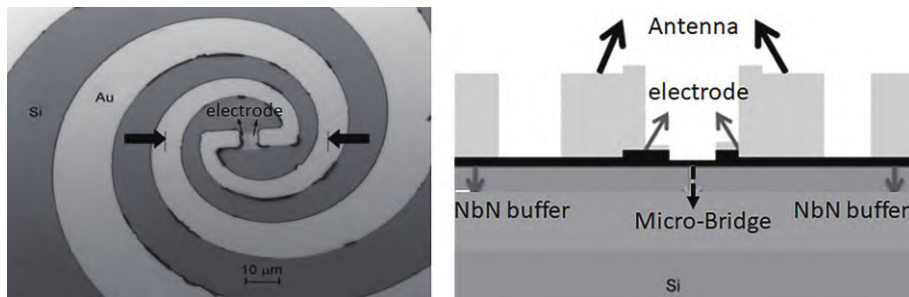


图 20 100 倍光学放大的 HEB 器件图形(左图)和 NbN HEB 器件的剖面结构示意图(右图)^[54]

Fig. 20 100 \times optical magnification of HEB device graph (left) and schematic of cross-sectional structure of NbN HEB device (right)^[54]

2.5.3 HEB 混频器技术代表性工作

1) NbN 声子冷却的 HEB 混频器

莫斯科国立师范大学^[55]在 HEB 技术方面做出了出色工作。1998 年,该校公布了 NbN 声子冷却的 HEB 混频器最新成果。工作频率在 820 GHz 和 900 GHz 时的噪声温度分别为 1100 K 和 980 K。图 21 显示了 DSB 噪声温度随频率的变化关系。可以发现,基于 HEB 混频器的准光学和波导接收器的噪声温度已经超过 $1 \text{ K} \cdot \text{GHz}^{-1}$ 的水平,606 GHz 处出现最佳噪声温度为 408 K^[56]。

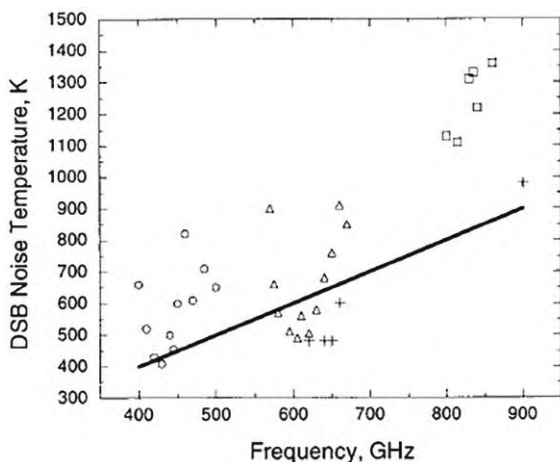


图 21 HEB 混频器 DSB 噪声温度随频率变化关系^[55]。‘o’、‘□’、‘+’数据来自文献[57-58]

Fig. 21 HEB mixer DSB noise temperature versus frequency^[55]. ‘o’, ‘□’, ‘+’ data are from Refs. [57-58]

在 620 GHz 频率下,测量的准光学 HEB 混频器的增益带宽达到 4 GHz,噪声温度带宽为 8 GHz。用光刻法制造的混频器所需局部振荡器的功率约为 1 mW,用电子束光刻法制造的混频器所需振荡功率约为 100 nW。基于 HEB 超导混频器的太赫兹接收器成为研究热点。

2) 国内太赫兹超导 HEB 混频技术

中国科学院紫金山天文台与俄罗斯莫斯科师范大学合作,在国际上率先实现基于 4 K 闭环制冷环境的 HEB 混频实验。在国内率先开展 HEB 混频技术研究,为青海德令哈观测站 13.7 m 毫米波望远镜提供技

术支持^[49]。

2.6 Schottky 结、HEB 和 SIS 结混频器性能比较

中国科学院紫金山天文台 Zhang 等^[14]总结了全球多个研究小组开发的超导 HEB 混频器 DSB 接收器的噪声温度 T^{DSB} 相关的成果。图 22 显示了不同频率下各研究组的噪声温度水平。可见 Schottky 混频器噪声普遍在 $50 h\nu/k_B$ 附近,SIS 混频器和 HEB 混频器噪声在 $5 h\nu/k_B$ 附近,比 Schottky 混频器高一个数量级,但距离理论上量子噪声极限($1 h\nu/k_B$)尚有距离,可通过改进 SIS 和 HEB 器件结构提升噪声水平。

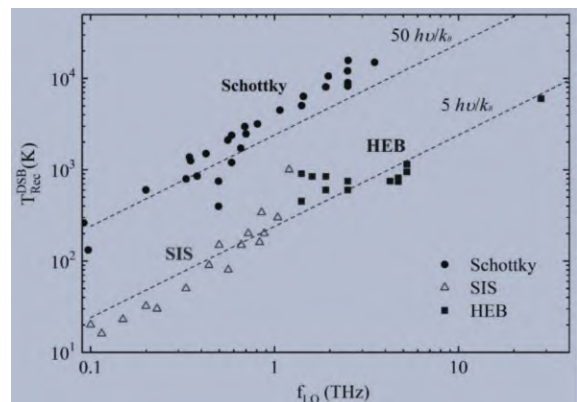


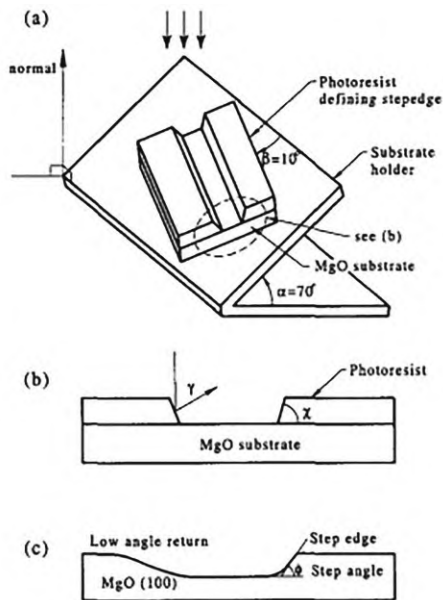
图 22 不同研究组公布的 $T_{\text{Rec}}^{\text{DSB}}$ 随频率变化关系^[14]

Fig. 22 $T_{\text{Rec}}^{\text{DSB}}$ frequency data from different research groups^[14]

2.7 其他混频器技术

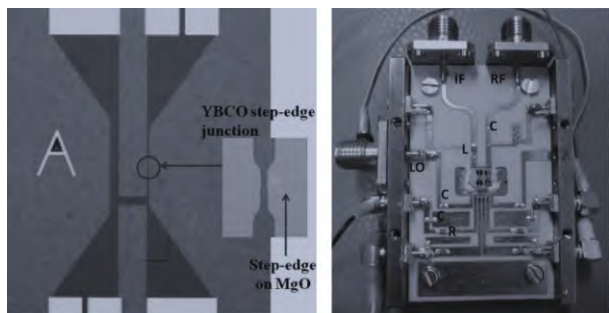
2.7.1 高温超导阶梯边缘结混频技术

由于 YBCO 高温超导体对空气环境极其敏感,难以制备高质量 YBCO 高温超导结。1999 年,澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的 Foley 团队^[59]是全球制备高质量 YBCO 高温超导体阶梯边缘约瑟夫森结技术的代表。圆底台阶制备工艺如图 23 所示,将角度 α 和 β 分别定义为样品对离子束的取向角和衬底绕衬底法线形成的轴的旋转角, γ 是离子束与抗蚀剂侧壁的偏离法线的角度, ϕ 是合成台阶边缘角, χ 是抗蚀剂侧壁角。该团队基于表面粗糙度优于 0.4 nm 的单面抛光的氧化镁(100)基片($0.5 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$),涂敷厚 1.3 μm 的光刻胶掩膜(Shipley S98913)。台阶的角度和形态由不同的 IBE 方向控

图 23 圆底边缘的各种取向角度的示意图^[59]Fig. 23 Schematic diagram of various orientation angles of round bottom edge^[59]

制。台阶高度由蚀刻时间控制。用磁控溅射的方式生长 YBCO 薄膜和金或银接触电极。

CSIRO 的 Du 团队^[60]在高温超导混频器方面做出持续贡献。该团队 2014 年基于 YBCO 高温超导开展系列约瑟夫森混频器的实验研究。提出一种基于 MgO 衬底上的 HTS 阶梯边缘结制造技术,制备出一种低边带下变频器。实现从 6~10 GHz 的无线电频率到 1~2 GHz 的中间频率的变换。2016 年基于对 YBCO 单片集成 Josephson 混频器模拟^[61],获得 -1 dB 的仿真转换效率。如图 24 所示,基于 MgO 基板生长 YBCO 阶梯边缘结,借助超导 MMIC 工艺,研制出 HTS 约瑟夫森混频器,可在 20~77 K 的范围内稳定运行。混频器在 -44.5 dBm 的极低 LO 功率下运行,获得了射频信号到中频信号的高度线性转换。扣除由于导线连接和阻抗失配造成的损失,在 40 K 时获得了 -11 dB 的最佳转换增益。通过与 HTS 薄膜滤波器的集成,研制

图 24 混频器与结区照片(左图)和封装后混频器(芯片 5 mm × 5 mm)(右图)^[62]Fig. 24 Photograph of mixer and junction area (left) and packaged mixer (chip 5 mm × 5 mm) (right)^[62]

出紧凑有效的耦合 MMIC 结构^[62]。

2018 年, Du 团队研究了一个双频片上天线耦合 HTS 约瑟夫森结 THz 第四谐波混频器。该天线利用几个不同结构的双槽结构实现两个频率的谐振辐射,并集成了优化设计的 CPW 网络,以实现良好的辐射耦合和信号隔离特性。电磁模拟结果表明,在 160 GHz 和 640 GHz 的工作频段,耦合效率分别高达 -4 dB 和 -3.5 dB。基于该双波段天线,开发了 640 GHz 第四谐波 HTS 混频器,20 K 和 40 K 时的测量转换增益分别为 -18 dB 和 -22 dB 左右。中频带宽大于 23 GHz。创造了亚太赫兹频段上 HTS 谐波混频器当时的最佳纪录^[63]。

2.7.2 HTS 本征结混频器技术

南京大学吴培亨院士团队在 Bi 系 HTS 本征结混频器方面做出了出色的工作。典型钙钛矿结构可以约化为多层超导结串联。1993 年,该校王华兵等成功地在高 T_c 的 Bi 系超导结上于 90 GHz 信号频率处实现了高达 67 次的谐波混频,其信噪比优于 10 dB,创造当时高 T_c 超导结中谐波次数最多、工作频率最高的混频实验纪录。1998 年,该校周赣东、尤立星等^[64]基于 Bi 系 HTS 研制出混频器,在 8 mm 频段上获得了最高为 68 次的谐波混频;3 mm 频段上获得了最高为 50 次的谐波混频。此外,该团队还设计与小型脉冲管制冷机配套的 HTS 混频测量系统,实现了 HTS 约瑟夫森结 3 mm 波段的 96 次谐波混频。这是国际上 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 本征结谐波混频的首次报道。

3 太赫兹混频器技术应用

太赫兹混频器通过与太赫兹源、放大器、低噪声放大器配合,通过微带线、波导和天线配合实现信号收发。太赫兹波谱具有的独特性质决定了其不同应用:1)高频短脉冲性能决定了其在快电子研究和超高空间和时间分辨研究,高信噪比检测方面的应用(反射波);2)低光子能量决定了其可应用于对材料无损检测和人体安检成像、人体生物器官组织成像;3)大带宽决定其在空间宽带通信方面的应用;4)特殊的光谱信息采集能力,应用于现实生活中生物分子的识别和结构表征(旋转和振动能级);5)独特的电磁吸收特性决定了其可用于不同固体材料的透射成像、极低浓度气体探测。太赫兹技术在航空通信、机场安保、目标探测、生物医学、天文观测等各方面的逐步应用,带动了太赫兹混频器技术的快速发展。从工作机制上分类,太赫兹应用分为探测、成像、通信和分子谱识别四大类。

3.1 探测^[65]

目标探测方面,太赫兹波由于具有高频带宽度,距离分辨率非常高($c/2B$, c 为光速, B 为带宽),一般达到毫米到数十微米分辨率,可用于空间目标近距离探测;反隐身探测方面,常规飞行器隐身材料针对毫米波、太

赫兹波具有更高频率、更短波长,可具有更好的隐身效果。

3.2 成像^[66]

安检成像方面,通常应用于机场安检成像,通常利用 Ka 或者 0.1 THz 频段波对人体携带枪支或金属危险品进行敏感探测,分辨率达到 1 cm。国内同方威视、杭州芯影、中电 38 所在安检成像方面做了大量技术研发,同方威视和杭州芯影已获民航认证;生物医学方面,利用太赫兹波强的穿透能力,且光子能量很小,借助生物的大分子如 DNA 分子的旋转和振动能级大多数都处于 THz 波段特点,实现对生物组织成像^[67];智能交通方面,可以借助太赫兹波数十微米级距离分辨率和角度分辨率(1° 左右)优势,实现近距离三维全息成像,实现目标三维信息抓取和图像实时构建,用于智能驾驶;天文成像方面,中国科学院紫金山天文台团队在 10 K 温区验证了高能隙 NdN 超导隧道结的高灵敏度特性^[68],实现国际上首次 NbN 基超导隧道结的天文观测^[69]。2019 年 4 月 10 日,事件视界望远镜发布了人类历史上第一张黑洞照片^[70]。2022 年 5 月 12 日,EHT 发布银河系中心黑洞人马座 A*(SgrA*)的首张照片,引起巨大轰动。显示了 SIS 混频器超强的探测灵敏度^[71]。另外,太赫兹成像在工业无损检测^[72]和单光子二维成像方面也有广泛的应用潜力^[73]。

3.3 通信^[74]

太赫兹波具有传输速率高、容量大、安全性高等诸多特性,在军事通信方面具有诱人的应用前景,已成为各国研究热点。星间通信方面,利用太赫兹波空间大气衰减小、带宽大、可克服常规通信频段干扰的特点,可实现空间高速数据通信;地面战场通信方面,太赫兹波大气衰减,可实现隐蔽的近距离通信。美国正在利用太赫兹传输距离相对较短、不易被截获的优势,研制 5 km 左右的近距离战术通信设备;民用地面宽带通信方面,杭州电子科技大学开展了地面太赫兹通信方面的研究,已完成太赫兹波图像传输实验,建立了太赫兹通信的原型,通信距离 2 km,传输速率达到 6 GBps。

3.4 分子谱识别^[75]

分子谱识别方面,由于 THz 的强穿透性,可利用其来检测大气环境中的有毒和有害分子,以达到环境的污染检测,可利用 THz 探测器对大气中各种气体的吸收强弱不同,来对其他含量及分布进行检测。

太赫兹源发射机和接收机,通常都离不开混频器上变频和下变频,来实现低成本、高性能的信号检测。混频器是实现变频的关键器件,将随着太赫兹市场的发展而扩大。

4 太赫兹混频器技术展望

虽然太赫兹混频器技术已取得长足发展,但仍然面临诸多挑战。Schottky 二极管混频器方面,目前国际知名 VDI 公司已制备出 1.9~2.8 THz Schottky 二

极管,国内与国外有较明显差距,主要集中在二极管研究方面,如专用集成电路重点实验室^[76]报道了基于 GaAs 空气桥结构的二极管,截止频率为 3.9 THz,国内其他单位基于平面工艺的混频器研制的 Schottky 频率在 600 GHz 以下,且噪声温度较高为 $50 h\nu/k_B$,需要基于先进的化合物半导体工艺线,开发出更高频率、更低噪声温度的器件和电路。另一方面,目前天线一体化集成上有待提升,需要将 Aip 等技术思路引入混频器及电路的设计制作过程;SIS 混频器普遍位于 1 THz 频率以下,频率有待提高。可在材料体系选择、器件结构设计、微型化集成方面研发,提高工作频率;HEB 混频器部分已达到 1 THz,但远未达到理论极限(数十太赫兹),可在器件电热一体化、天线一体化集成方面开展进一步深入研究。就噪声温度而言,SIS 混频器和 HEB 混频器现有最高水平在 $5 h\nu/k_B$ 左右,尚未达到量子理论极限 $h\nu/k_B$,因此,有必要开展器件材料、结构方面的设计与优化,以提高噪声温度水平。太赫兹混频器技术将向着低温度噪声、低变频损耗、高工作频率、宽频带、单片集成等方向发展。

太赫兹超导混频器在 2021、2022 年连续被列入科技部发布的“基础科研条件与重大科学仪器设备研发”重点专项指南。目前混频器尚有以下关键技术有待突破:1)超导混频器芯片设计与制备;2)超导混频器与低温低噪声放大器集成;3)一维相干探测接收机阵列集成,有必要降低温度噪声,提升中频带宽和集成化水平,将自主知识产权混频器技术推向产业化。

参 考 文 献

- [1] Stephen A M. Nonlinear microwave and RF circuit[M]. 2nd ed. New York: Artech, 2003.
- [2] 杨晓帆. 基于平面肖特基二极管的太赫兹分谐波混频器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
Yang X F. Study on terahertz subharmonic mixer based on the planar Schottky diode[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [3] 蒋均, 何月, 王成, 等. 基于 Schottky 二极管和 Hammer-Head 滤波器 0.67 THz 二次谐波混频器[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(4): 418-424.
Jiang J, He Y, Wang C, et al. 0.67 THz sub-harmonic mixer based on Schottky diode and hammer-head filter[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(4): 418-424.
- [4] 韩鹏. 基于肖特基二极管的太赫兹混频器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
Han P. Study of the THz subharmonic mixer based on Schottky diode[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [5] Barychev A M. Superconductor-insulator-superconductor THz mixer integrated with a superconducting flux flow oscillator[D]. Moscow: Moscow Institute of Physics and Technology, 2005.
- [6] Hu Q, Richards P L. Quasiparticle mixers and detectors

- [M]//Ruggiero S T, Rudman D A. Superconducting devices. London: Academic Press, 1990: 169-196.
- [7] Uchida T, Yazaki H, Yasuoka Y, et al. Slot antenna coupled $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ hot-electron bolometers for millimeter-wave radiation[J]. *Physica C: Superconductivity*, 2001, 357/358/359/360: 1596-1599.
- [8] Uchida T, Yasuoka Y, Suzuki K. IF properties of YBCO hot-electron bolometer mixers for millimeter-wave radiation[J]. *Physica C: Superconductivity*, 2002, 372/373/374/375/376: 387-390.
- [9] Zhang H B, Xiao L, Guo J H, et al. The potential and challenges of time-resolved single photon detection based on current-carrying superconducting nanowires[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2019, 53(1): 013001.
- [10] Caputo M, Cirillo C, Attanasio C. NbRe as candidate material for fast single photon detection[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(19): 192601.
- [11] Zhang L, You L X, Peng W, et al. Quasiparticle scattering time in NbN superconducting thin films[J]. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 2020, 579: 1353773.
- [12] Jiang L, Li C, Shiino T, et al. Intrinsic mixing behavior of superconducting NbTiN hot electron bolometer mixers based on *in situ* technique[J]. *Physica C: Superconductivity*, 2013, 485: 120-124.
- [13] Miao W, Zhang W, Zhong J Q, et al. Non-uniform absorption of terahertz radiation on superconducting hot electron bolometer microbridges[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(5): 052605.
- [14] Zhang W, Miao W, Ren Y, et al. Superconducting hot-electron bolometer mixers and their applications[J]. *Superconductivity*, 2022, 2: 100009.
- [15] Skocpol W J, Beasley M R, Tinkham M. Self-heating hotspots in superconducting thin-film microbridges[J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(9): 4054-4066.
- [16] Floet D W, Miedema E, Klapwijk T M, et al. Hotspot mixing: a framework for heterodyne mixing in superconducting hot-electron bolometers[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(3): 433-435.
- [17] Champlin K S, Eisenstein G. Cutoff frequency of submillimeter Schottky-barrier diodes[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1978, 26(1): 31-34.
- [18] 姚常飞, 周明, 罗运生, 等. 基于肖特基势垒二极管的太赫兹固态倍频源和检测器研制[J]. *电子学报*, 2013, 41(3): 438-443.
- Yao C F, Zhou M, Luo Y S, et al. Development of terahertz frequency solid state multiply sources and sensors with Schottky barrier diodes[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(3): 438-443.
- [19] 赵鑫, 蒋长宏, 张德海, 等. 基于肖特基二极管的 450 GHz 二次谐波混频器[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(3): 301-306.
- Zhao X, Jiang C H, Zhang D H, et al. Schottky diode-based 450 GHz second harmonic mixer[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2015, 34(3): 301-306.
- [20] Cohn M, Degenford J E, Newman B A. Harmonic mixing with an anti-parallel diode pair[J]. *S-MTT International Microwave Symposium Digest*, 1974, 74(1): 171-172.
- [21] Lee B H, Kim S C, Lee M K, et al. Q-band high conversion gain active sub-harmonic mixer[J]. *Current Applied Physics*, 2004, 4(1): 69-73.
- [22] Marsh S, Alderman B, Matheson D, et al. Design of low-cost 183 GHz subharmonic mixers for commercial applications[J]. *IET Circuits*, 2007, 1(1): 1-6.
- [23] Wilkinson P, Henry M, Wang H, et al. The design of a 664 GHz Subharmonic Mixer[C]//2nd UK-Europe-China Workshop on Millimetre Wave and Terahertz Technologies, October 10, 2009. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=330884c7f3000307ce5e51c1575cf922&site=xueshu_se.
- [24] Thomas B, Siles J, Schlecht E, et al. First results of a 1.2 THz MMIC sub-harmonic mixer based GaAs Schottky diodes for planetary atmospheric remote sensing [C]//23rd International Symposium on Space Terahertz Technology 2012 (ISSTT 2012), April 2-4, 2012, Tokyo, Japan. http://industry.wanfangdata.com.cn/yj/Detail/NSTLHY?id=NSTLHY_NSTL_HYCC0213876695.
- [25] Bulcha B T, Kurtz D S, Groppi C, et al. THz Schottky diode harmonic mixers for QCL phase-locking[C]//2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 1-6, 2013, Mainz, Germany. New York: IEEE Press, 2013.
- [26] Fujiwara N, Jiang M J, Takaki T, et al. Super-telephoto drone tracking using HFR-video-based vibration source localization[C]//2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), December 6-8, 2019, Dali, China. New York: IEEE Press, 2019: 2239-2244.
- [27] Farran. Harmonic Mixers (WHMB)[EB/OL]. [2022-06-03]. <https://farran.com/farran-products/harmonic-mixers-whmb>.
- [28] 许正彬, 钱澄, 窦文斌, 等. 基于微带线的 W 波段二次分谐波混频器设计[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(3): 242-247.
- Xu Z B, Qian C, Dou W B, et al. Design of a W-band sub-harmonic mixer by employing microstrip technology [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(3): 242-247.
- [29] 赵帅. W 波段谐波混频器设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- Zhao S. Design of W-band harmonic mixer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [30] 侯健宏. 微波毫米波混频技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- Hou J H. Research on microwave and millimeter wave mixing technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [31] 纪东峰. 太赫兹关键技术及其辐射计应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- Ji D F. Terahertz key technology and its radiometer application[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [32] 蒋伊伊. 毫米波谐波混频器技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.

- Jiang Y Y. Research on millimeter wave harmonic mixer technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021.
- [33] 何婷婷, 李少甫, MahmudNahid-Al, 等. 肖特基二极管太赫兹混频器研究进展[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(5): 4-6, 10.
- He T T, Li S F, Mahmud N, et al. Research progress on Schottky diode terahertz mixers[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(5): 4-6, 10.
- [34] Gao X, Zhang T, Du J, et al. Design, modelling and simulation of a monolithic high- T_c superconducting terahertz mixer[J]. Superconductor Science and Technology, 2018, 31(11): 115010.
- [35] Zhang T, Pegrum C, Du J, et al. Simulation and measurement of a Ka-band HTS MMIC Josephson junction mixer[J]. Superconductor Science and Technology, 2017, 30(1): 015008.
- [36] 张照锋, 许伟伟, 钟扬音, 等. 500 GHz 超导 SIS 混频器的设计[J]. 低温物理学报, 2010, 32(1): 65-68.
- Zhang Z F, Xu W W, Zhong Y Y, et al. The design of superconductor mixer at 500 GHz[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2010, 32(1): 65-68.
- [37] Jackson B D, de Lange G, Zijlstra T, et al. Low-noise 0.8-0.96- and 0.96-1.12-THz superconductor-insulator-superconductor mixers for the Herschel space observatory [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(2): 547-558.
- [38] Esaki L. New phenomenon in narrow germanium p-n junctions[J]. Physical Review, 1958, 109(2): 603-604.
- [39] Giaever I. Electron tunneling and superconductivity[J]. Science, 1974, 183(4131): 1253-1258.
- [40] Tucker J R. Quantum limited detection in tunnel junction mixers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1979, 15(11): 1234-1258.
- [41] Shen T M, Richards P L, Harris R E, et al. Conversion gain in mm-wave quasiparticle heterodyne mixers[J]. Applied Physics Letters, 1980, 36(9): 777-779.
- [42] Taur Y, Claassen J H, Richards P L. Conversion gain in a Josephson effect mixer[J]. Applied Physics Letters, 1974, 24(2): 101-103.
- [43] Uzawa Y, Wang Z, Kawakami A. Quasi-optical submillimeter-wave mixers with NbN/AlN/NbN tunnel junctions[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(16): 2435-2437.
- [44] Westig M P, Jacobs K, Stutzki J, et al. Balanced superconductor-insulator-superconductor mixer on a 9 μm silicon membrane[J]. Superconductor Science and Technology, 2011, 24(8): 085012.
- [45] Li J, Takeda M, Wang Z, et al. Low-noise 0.5 THz all-NbN superconductor-insulator-superconductor mixer for submillimeter wave astronomy[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(22): 222504.
- [46] Shan W, Ezaki S, Liu J, et al. Planar superconductor-insulator-superconductor mixer array receivers for wide field of view astronomical observation[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10708: 1070814.
- [47] Shan W L, Ezaki S, Kaneko K, et al. Experimental study of a planar-integrated dual-polarization balanced SIS mixer[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019, 9(6): 549-556.
- [48] Tan B K, Yassin G, Grimes P, et al. Preliminary measurement results of a 650 GHz planar circuit balanced SIS mixer[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(1): 32-38.
- [49] Miao W, Zhang W, Delorme Y, et al. Non-uniform absorption of terahertz radiation in superconducting hot electron bolometer mixers[J]. Physics Procedia, 2012, 36: 330-333.
- [50] Nahum M, Richards P L, Mears C A. Design analysis of a novel hot-electron microbolometer[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1993, 3(1): 2124-2127.
- [51] 周康敏. 超高灵敏度太赫兹超导 HEB 混频器特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- Zhou K M. Study on characteristics of ultra-sensitive THz superconducting HEB mixer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [52] Yagoubov P, Gol'tsman G N, Voronov B, et al. The bandwidth of HEB mixers employing ultrathin NbN films on sapphire substrate[EB/OL]. [2022-07-15]. <http://www.nrao.edu/meetings/isstt/papers/1996/1996290302.pdf>.
- [53] Ekström H, Kollberg E, Yagoubov P, et al. Gain and noise bandwidth of NbN hot-electron bolometric mixers [J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(24): 3296-3298.
- [54] 王金平, 康琳, 王玉, 等. 超导 HEB 混频器的设计与制备[J]. 科学通报, 2009, 54(9): 1218-1221.
- Wang J P, Kang L, Wang Y, et al. Design and fabrication of superconducting HEB mixer[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(9): 1218-1221.
- [55] Gol'tsman G N, Gershenzon E M. Phonon-cooled hot-electron bolometric mixer: overview of recent results[J]. Applied Superconductivity, 1999, 6(10/11/12): 649-655.
- [56] Kawamura J, Blundell R, Tong C Y E, et al. Phonon-cooled NbN HEB mixers for submillimeter wavelengths [EB/OL]. [2022-06-05]. <https://www.nrao.edu/meetings/isstt/papers/1997/1997023028.pdf>
- [57] Kawamura J, Blundell R, Tong C Y E, et al. Low noise NbN lattice-cooled superconducting hot-electron bolometric mixers at submillimeter wavelengths[J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(12): 1619-1621.
- [58] Kroug M, Yagoubov P, Gol'tsman G, et al. NbN quasioptical phonon cooled hot electron bolometric mixers at THz frequencies[C]//3rd European Conference on Applied Superconductivity, Veldhoven, Netherlands, 1997. https://www.researchgate.net/publication/295538199_NbN_quasioptical_phonon_cooled_hot_electron_bolometric_mixers_at_THz_frequencies.
- [59] Foley C P, Mitchell E E, Lam S K H, et al. Fabrication and characterisation of YBCO single grain boundary step edge junctions[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, 9(2): 4281-4284.
- [60] Bai D, Du J, He Y S. Characterizations of high-temperature superconducting step-edge Josephson junction mixer[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 1-4.

- [61] Pegrum C, Zhang T, Du J, et al. Simulation of HTS Josephson mixers[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3): 1500905.
- [62] Gao X, Du J, Zhang T, et al. 0.34- THz high-temperature superconducting Josephson-junction mixer with superior noise and conversion performance[C]//2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 9-14, 2018, Nagoya, Japan. New York: IEEE Press, 2018.
- [63] Gao X, Du J, Zhang T, et al. High-T_c superconducting fourth-harmonic mixer using a dual-band terahertz on-chip antenna of high coupling efficiency[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019, 9(1): 55-62.
- [64] 周赣东, 单文磊, 尤立星, 等. 高温超导内禀结在毫米波的谐波混频[J]. 低温物理学报, 1999, 21(2): 111-115. Zhou G D, Shan W L, You L X, et al. Harmonic mixing in the millimeter waveband using high T_c intrinsic Josephson junctions[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 1999, 21(2): 111-115.
- [65] 成彬彬, 江舸, 杨陈, 等. 太赫兹 FMCW 雷达近感探测技术[J]. 制导与引信, 2013, 34(2): 24-28. Cheng B B, Jiang G, Yang C, et al. The technology on terahertz FMCW radar for proximity detection[J]. Guidance & Fuze, 2013, 34(2): 24-28.
- [66] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G, et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(1): 64-66.
- [67] 王与桦, 蒋博周, 徐德刚, 等. 基于焦平面阵列的连续太赫兹波生物组织成像技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0711001. Wang Y Y, Jiang B Z, Xu D G, et al. Continuous terahertz wave biological tissue imaging technology based on focal plane array[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0711001.
- [68] Li J, Takeda M, Wang Z, et al. Characterization of the mixing performance of all-NbN superconducting tunnel junctions at 0.5 THz[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 417-422.
- [69] 李春光, 王佳, 吴云, 等. 中国超导电子学研究及应用进展[J]. 物理学报, 2021, 70(1): 018501. Li C G, Wang J, Wu Y, et al. Recent progress of superconducting electronics in China[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(1): 018501.
- [70] Tamaoki S, Sugitani K, Nguyen-Luong Q, et al. Magnetic stability of massive star-forming clumps in RCW 106[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2019, 875(2): L16.
- [71] Akiyama K, Alberd A, Alef W, et al. First Sagittarius A* event horizon telescope results. II. EHT and multiwavelength observations, data processing, and calibration[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2022, 930(2): L13.
- [72] 张振伟, 赵跃进, 缪寅宵, 等. 基于线性调频机制的太赫兹无损检测成像技术[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0411002. Zhang Z W, Zhao Y J, Miao Y X, et al. Terahertz nondestructive testing imaging technology based on linear frequency modulation mechanism[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0411002.
- [73] 尹晓琴, 范书振, 李永富, 等. 和频、差频共存的太赫兹波上转换探测理论分析[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1214001. Yin X Q, Fan S Z, Li Y F, et al. Theoretical analysis of terahertz-wave frequency up-conversion detection based on coexisting difference-and sum-frequency generation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1214001.
- [74] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 371-379.
- [75] Drouin B J, Tang A, Schlecht E, et al. A CMOS millimeter-wave transceiver embedded in a semi-confocal Fabry-Perot cavity for molecular spectroscopy[J]. The Journal of Chemical Physics, 2016, 145(7): 074201.
- [76] 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 D, Feng Z H, Wang J L, et al. THz GaAs Schottky diodes with point support airbridae structure[J]. Semiconductor Technology, 2013, 38(4): 279-282.