

文章编号 2095-1531(2017)01-0122-09

超高灵敏度太赫兹超导探测技术发展

李婧*, 张文, 缪巍, 史生才

(中国科学院紫金山天文台射电天文重点实验室, 江苏南京 210000)

摘要: 太赫兹波段占有宇宙微波背景(CMB)辐射以后宇宙空间近一半的光子能量,该波段在天文学研究中具有不可替代的作用,因此太赫兹天文学的研究,具有极其重要的科学意义。本文系统介绍了基于超高灵敏度太赫兹超导探测技术的太赫兹相干探测器发展状况,包括超导隧道结混频器(SIS)和超导热电子混频器(HEB),以及以超导动态电感探测器(MKIDs)和超导相变边缘探测器(TES)为代表的非相干探测器的研究。在此基础上,展望了该领域未来发展趋势,对我国太赫兹天文探测技术的发展具有一定的参考意义。

关键词: 太赫兹; 超导; 相干探测; 非相干探测

中图分类号: P161 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20171001.0122

Development of ultra high sensitivity superconducting THz detectors

LI Jing*, ZHANG Wen, MIAO Wei, SHI Sheng-cai

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210000, China)

* Corresponding author, E-mail: lijing@pmo.ac.cn

Abstract: Nearly half of the photon energy is occupied in Terahertz waveband after the cosmic microwave background(CMB) radiation in space, which plays an irreplaceable role in the study of astronomy. So the terahertz astronomy research has extremely important scientific significance. In this paper, we introduce the development of the terahertz coherent detectors based on ultra high sensitivity superconducting terahertz detection technology, including superconducting tunnel junction the mixer(SIS) and superconducting hot electron mixer(HEB), and non coherent detectors such as superconducting dynamic inductance detector(MKIDs) and superconducting transition edge detector(TES). The future development trend is also prospected. The review for superconducting THz detectors has the reference significance for the development of astronomical terahertz detection technique in our country.

Key words: THz; superconductor; coherent detection; incoherent detection

收稿日期: 2016-09-30; 修订日期: 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器研制专项资助项目(No. 11127903); 国家自然科学基金重大基金资助项目(No. 11190012); 国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(No. 11422326)

Supported by Major Program of National Natural Science Foundation of China(No. 11127903, No. 11190012); National Natural Science Funds for Excellent Young Scholar(No. 11422326)

1 引言

1.1 太赫兹天文及大气科学

从20世纪90年代以来,国际上太赫兹频段的一系列重要天文观测发现已经冲击了天体物理各个层次的研究。太赫兹波段占有宇宙微波背景(CMB)辐射以后宇宙空间近一半的光子能量,该波段在天文学研究中具有不可替代的作用。例如,位于夏威夷 Muna Kea 的 JCMT 望远镜的 SCUBA 深度巡天发现了亚毫米波星系团和星系,这些最原始的星系在哈勃空间望远镜(HST)深场内竟没有光学对应体^[1]。与光学近红外波段相比,它具有穿透星际尘埃的能力,有更高的空间与时间相干性;而与微波毫米波段相比,则具有更高空间分辨率,还可具有更宽瞬时带宽。

总体来讲,太赫兹波段天文学研究的基本特点包括:(1)根据维恩位移定律,10 K 黑体辐射功率的峰值出现在约 1 THz,所以它是天体形成阶段冷暗目标最适合观测的波段;(2)早期遥远天体由于多普勒频移效应,其辐射落入太赫兹频段,且星际尘埃吸收早期遥远天体的紫外/可见光后产生亚毫米波辐射,所以它是早期遥远天体最适合观测的波段;(3)星际介质遮挡在 THz 波段远弱于可见光/近红外,所以它是研究星际尘埃和气体分子云内部星际介质和恒星物理状态的独特波段;(4)太赫兹波段有丰富的分子谱线和精细结构原子谱线,被称为分子/原子谱线“森林”。因此,太赫兹波天文学研究对于理解宇宙状态和演化有非常重要的意义,正成为现代天体物理的前沿研究领域之一^[2-3]。

因为太赫兹波与分子转动的强相互作用会导致强吸收或发射谱线,这一特征使得太赫兹波段除了在天文学具有特别重要的科学意义外,在其他学科也具有广泛的研究价值,例如:特别适合大气及分子科学研究等。太赫兹波段覆盖了地球大气中重要的探针分子,且具有全天候观测的独特优势,是开展地球大气观测研究及大气污染监测的独特波段。针对地球大气同温层和对流层中太赫兹分子谱线的高精度测量将是理解地球大气臭氧层变化和全球气候变暖与人类温室气体排放之

间关系的有效手段之一,非常有助于建立精确的地球大气模型,进而更清晰了解目前地球大气状态和预测未来的臭氧层和全球气候变化。

1.2 太赫兹超导探测器

尽管人们早已认识到太赫兹波段具有非常重要的科学意义和广泛的应用前景,但该波段仍然是一个有待全面研究和开发的电磁频率窗口。制约太赫兹波段发展与应用的主要因素有:(1)太赫兹信号产生技术的严重缺乏,包括信号源的频率范围和输出信号功率等方面;(2)太赫兹信号探测技术的严重缺乏,包括探测灵敏度、带宽、响应时间、以及探测器阵列规模等问题;(3)大气衰减的限制。因此,发展具有超高灵敏度的太赫兹探测技术,是推动太赫兹技术发展的重要因素。上世纪末,天体物理学、宇宙学、大气物理学等基础科学研究的发展极大推动了太赫兹频段高灵敏度探测技术的发展,特别是基于低温超导器件的探测技术,已经成为该波段灵敏度最高的探测器,在天体物理和宇宙学观测研究中正发挥越来越重要的作用。而其在宇宙学和天体物理研究领域的应用则导致了利用宇宙背景辐射(CMB)场分布精确测量宇宙学参数、SCUBA 星系的发现等一系列重大科学突破,正在太赫兹观测设备中发挥着越来越重要作用。与半导体探测器相比,太赫兹超导探测器除了有超高灵敏度的优点外,还有平面工艺制备、本振信号功率需求低、高动态范围和响应时间快等优点。目前,太赫兹超导探测技术正在向更高频率、更高灵敏度和更大规模方向发展。

与其它波段类似,太赫兹探测器分成相干探测器和非相干探测器两大类^[3]。太赫兹相干探测器能够同时探测信号的幅度和相位信息^[4],主要应用于高频率分辨率的分子和原子谱线观测,以及具有高空间分辨率的天线干涉阵列,主要有超导隧道结(SIS)混频器和超导热电子混频器(HEB)两种,前者主要应用于1 THz 以下频段,后者多用于1 THz 以上频段。太赫兹非相干探测器则只能探测信号的幅度信息,而不能获取其相位信息,主要应用于低频率分辨率的连续谱观测和分光频谱仪的中频率分辨率谱线观测,主要有超导动态电感探测器(MKIDs)和超导相变边缘探测

器 (TES)^[3]。

2 国内外发展现状与趋势

2.1 太赫兹超导相干探测器

2.1.1 超导隧道结 (SIS) 混频器 超导隧道结 (SIS) 混频器是基于准粒子隧穿效应的量子混频器, 它是由两块超导体及其中间极薄的势垒层构成。超导隧道结混频器的典型伏安特性是基于准粒子隧穿效应, 而非库伯对隧穿效应。它除了取决于其超导和绝缘层材料的本征特性外, 还与制备工艺密切相关。其工作频率上限主要取决于所采用超导材料的能带。例如, 目前应用最广泛的铌 (Nb) 和铌钛氮 (NbTiN) 超导 SIS 混频器主要工作在太赫兹低频段 (0.1 ~ 1.4 THz), 其噪声性能在低于 0.7 THz 的频率范围内已达 3 倍量子极限, 但在 0.7 ~ 1.4 THz 的区间尚未突破 5 倍量子极限。

超导 SIS 混频器的其他典型特征还包括: 稳定工作变频增益高 (~0 dB); 瞬时带宽基本无限制, 至少可达几十 GHz; 本振功率需求 (100% 耦合情况) 在 0.1 THz 约几 nW, 但随频率的平方增加; 与超导 HEB 混频器相比, 可稳定工作电压区间宽, 但在能隙频率 f_{gap} 以上逐渐减小直到零。

超导 SIS 混频器的性能在其能隙频率以上将急剧恶化, 主要原因是混频电路中超导体吸收光子能量拆开其中的库伯对, 进而导致能量损耗。另一方面, 超导 SIS 混频器的上限频率约为其能隙频率的两倍^[5]。

目前超导 SIS 研究领域主要有两个方向: 一是在现有较成熟的 Nb 超导 SIS 混频器中引入高能隙超导材料作为其调谐和阻抗变换电路的导体。这种情况可以解决 0.7 THz 以上 Nb 超导电路的损耗问题, 但 SIS 混频器的频率上限仍限制在 1.4 THz; 另外一个方向则是利用高能隙超导材料实现具有更高 f_{gap} 的超导 SIS 结及其混频电路, 其频率上限有望突破 1.4 THz。荷兰 SRON/TU Delft 研究小组是前一种的代表, 主要应用 Nb-TiN 超导薄膜并结合基于 AlN 势垒层的高临界电流密度 Nb 超导 SIS 结制备技术, 在 1 THz 频率附近取得了较理想的结果。Caltech/JPL 和 NiCT/

NAOJ/PMO 研究小组是后一种的代表, 其中美国 Caltech/JPL 小组主要致力于高 J_c 全 NbTiN 超导 SIS 结和 NbTiN/Nb 混合 SIS 结的研究, 除了实现良好噪声性能外, 也实现了迄今为止频率最高的超导 SIS 混频技术^[6-8]。NiCT/NAOJ/PMO 研究小组一直努力发展全 NbN 超导 SIS 结混频器, 为 ALMA 计划第十波段 (787 ~ 950 GHz) 所研制的全 NbN 波导型 SIS 混频器已达到了低于 5 倍量子极限的噪声温度, 而高性能的 0.5 THz 全 NbN 超导 SIS 混频器则实现了天文观测的首次应用^[9-10], 相关成果如图 1 所示。

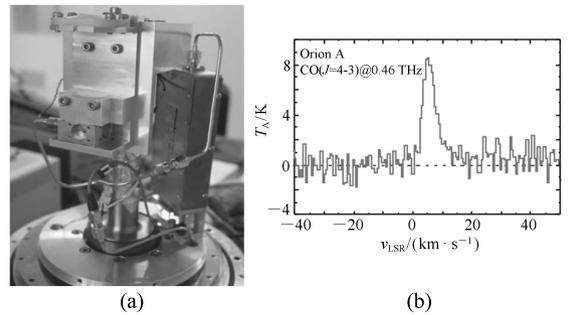


图 1 (a) 0.5 THz 氮化铌超导 SIS 接收机系统和 (b) 第一条基于其观测的天文谱线

Fig. 1 (a) 0.5 THz NbN SIS receiver and (b) the 1st astronomical observation ever done with NbN SIS mixers

2.1.2 超导热电子 (HEB) 混频器

超导热电子混频器由超导微桥和射频耦合电路构成 (如图 2 所示)。射频耦合电路将自由空间中的太赫兹辐射耦合到超导微桥。超导微桥为一层超薄膜, 其电子吸收太赫兹辐射后温度升高超过环境温度形成热电子。随后通过电子-声子相互作用将能量传递给声子从而升高声子温度, 最后热量逃逸到介质基板中而重新恢复平衡态。这种方式称为声子制冷型超导 HEB 混频器^[11], 通常采用 NbN、NbTiN 等化合物超导材料, 要求超导微桥很薄, 并与介质基板具有很好的晶格匹配, 热量可以很快逃逸到介质基板。除此之外, 超导微桥里电子吸收的能量也可以通过电子运动扩散到两端电极里而恢复平衡态, 这种方式称为扩散制冷型超导 HEB 混频器^[12], 通常采用 Nb、Al 等纯金属超导材料, 要求超导微桥很短的

同时超导薄膜具有较大的电子扩散系数,热量迅速传递到两端电极。随着对超导 HEB 混频机制的深入理解、制备工艺的逐渐成熟和测试系统的不断改进,超导 HEB 混频器的接收机噪声温度已经全面超过 10 倍量子极限,个别频率点突破 5 倍量子噪声极限,成为 1 THz 以上灵敏度最高的相干探测器,并被成功应用到地面望远镜 APEX,机载望远镜 SOFIA、空间卫星 Herschel 等。

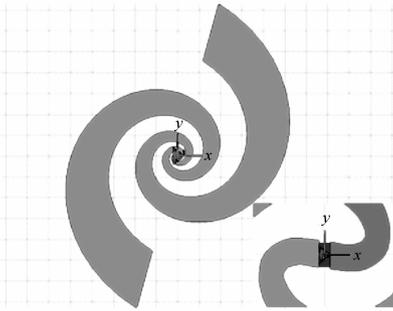


图2 HEB 器件结构平面示意图

Fig.2 Structure diagram of the HEB device

超导热电子混频器由俄罗斯莫斯科师范大学于 1990 年提出并首先发展起来。在低温下,超导体中的电子-声子相互作用变弱,使得电子和声子可以分别用各自的有效温度表示。在直流和本振功率作用下,超导微桥中的电子温度升高超过电子温度,形成热电子。当电子温度加热到临界温度附近时,超导器件的电阻对温度极其敏感,从而实现高灵敏度检测。最开始的超导 HEB 混频器采用 Nb 材料制备超导微桥,其电子声子相互作用约为 1 ns,导致超导 HEB 混频器的中频带宽约为 1 MHz。NbN 超导薄膜的电子声子相互作用时间约为 10 ps,因此中频带宽超过 3 GHz,从而满足大多数实际应用需求。1993 年,美国耶鲁大学 Prober 提出了扩散制冷型超导热电子混频器,纯金属超导材料具有较大的电子热扩散率,相应的热恢复长度为数百纳米。当超导微桥长度小于热恢复长度时,热电子运动将超导微桥吸收的热量扩散到接触电极实现制冷。中频带宽与超导微桥长度的平方成反比,因此为了保证与平面天线的良好阻抗匹配,在缩短微桥长度的同时,要求微桥宽度成比例减小。这给器件制备带来了极大的挑战,另外随着超导微桥体积的减小,其稳定性也很

难保证。因此电子扩散制冷型超导热电子混频器在发展了一段时间后,逐渐平静下来。目前超导热电子混频器主要采用 NbN 薄膜,随着对其工作机理的深入理解和工艺水平的提高,接收机噪声温度全面达到 10 倍量子极限,个别频率突破 5 倍量子极限,成为 1.5 THz 以上最灵敏的相干探测器。超导热电子混频器的中频带宽超过 3 GHz,基本满足实际应用需求。

当前,超导 HEB 混频器的发展趋势及重要新成果主要有以下几个方面:拓宽中频带宽;平衡混频器充分利用有限的信号功率;提高工作频率;多波束超导热电子混频器;更高工作温度的超导热电子混频器。

2.1.3 基于量子级联激光器(QCL)的超导集成接收机^[13-15]

在太赫兹相干探测器中,除了需要具有高灵敏度外差混频器,还需要有高频率和功率稳定度的本振泵浦源。在太赫兹高频段(如 2 THz 以上),本振泵浦源技术一直相对匮乏。近些年,一种新型单极半导体源-量子级联激光器取得了快速发展。量子级联激光器是基于电子在半导体材料量子阱中导带子带间跃迁的单极半导体激光器,它不同于传统 p-n 结型半导体激光器利用电子-空穴复合受激辐射机制,其辐射激光波长不受半导体材料限制,而是由量子阱两个激发态间能量差决定,可覆盖中红外到太赫兹超宽光谱频段。1994 年,J. Faist 等人在贝尔实验室首先成功实现红外频段(75 THz)量子级联激光器。2002 年,意大利 A. Tredicucci 研究小组首次实现了太赫兹频段(4.4 THz)量子级联激光器。此后,量子级联激光器在辐射功率、频率以及工作温度等方面均有显著突破,已成为太赫兹相干探测器中最理想本振泵浦源。

2005 年,荷兰 SRON 研究小组首先将金属-金属波导型 2.8 THz 量子级联激光器作为本振泵浦源应用到太赫兹超导热电子相干探测器中。随后,太赫兹量子级联激光器在本振源应用方面取得一系列进展。其中最显著研究成果之一是荷兰 SRON 研究所、TUDelft 大学、美国 MIT 研究所、中科院紫金山天文台等合作,开展了太赫兹量子级联激光器泵浦太赫兹超导热电子混频器的相干探

测,首次实现了基于太赫兹量子级联激光器泵浦太赫兹超导热电子混频器的 2.9 THz 和 3.5 THz 甲醇气体分子谱线高频谱分辨率波谱特性测量。荷兰 SRON 研究所等采用了三阶反馈式太赫兹量子级联激光器,相比传统金属-金属波导型激光器,三阶分布反馈式激光器实现了数倍的激光器输出功率提高,实现了准高斯波束的远场分布。另外,他们还以分子吸收谱线为参考,利用 PID (Proportional Integral Derivative) 控制器将太赫兹量子级联激光器输出频率锁定到特定分子吸收谱线上,同时以 voice coil 作为快速功率可控衰减器,利用 PID 控制器驱动 voice coil 稳定了太赫兹量子级联激光器与超导热电子混频器之间信号耦合。然而,由于太赫兹量子级联激光器连续模式工作时热功耗往往较大(达几瓦甚至几十瓦),太赫兹量子级联激光器作为本振泵浦源使用时通常需要单独使用 4K 杜瓦冷却激光器,使得太赫兹相干探测系统结构复杂,难以实际应用。因此,研究太赫兹量子级联激光器在相干探测系统中的集成应用显得尤为重要,也成为太赫兹量子级联激光器本振泵浦源应用的研究重点。

太赫兹量子级联激光器作为本振泵浦源的最新研究成果主要包括:(1) 德国 DLR 研究小组基于机械脉冲管两级制冷机集成太赫兹量子级联激光器和超导热电子混频器,其中太赫兹量子级联激光器集成在制冷机的首级 45 K 温度平台,超导热电子混频器置于次级 4 K 温度平台。太赫兹量子级联激光器波束通过制冷机窗口耦合至外部空间利用聚焦透镜和反射镜再次耦合至太赫兹超导热电子混频器。该方法成功地将太赫兹量子级联激光器与超导热电子混频器集成在一体机械制冷机中,极大地简化了系统复杂度。另外,该研究组还利用小型斯特林制冷机作为太赫兹量子级联激光器低温工作平台,实验中所利用斯特林制冷机仅需 240 W 功耗,65 K 温度下可提供 7 W 制冷功率。该方法实现了一种小型低功耗的太赫兹量子级联激光器本振源系统。(2) 美国 Sandia 国家实验室将太赫兹量子级联激光器与肖特基混频器通过太赫兹光子集成电路集合,实现了一体化全固态的太赫兹相干探测器。该方法利用太赫兹量子级联激光器作为本振泵浦源,通过利用高掺杂度的砷化镓层将太赫兹量子级联激光器与肖特

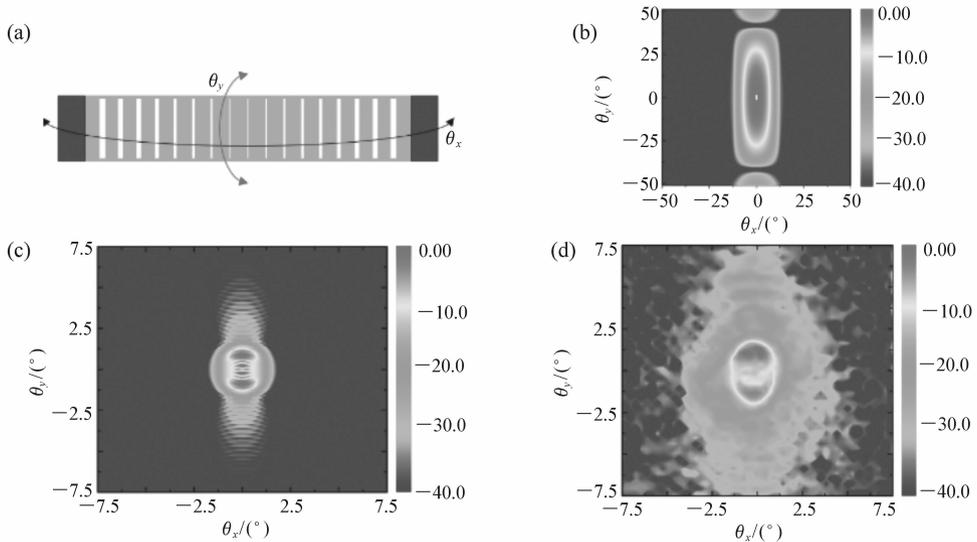


图 3 (a) 2.7 THz 量子级联激光器结构示意图, (b) 模拟仿真整形前 2.7 THz 量子级联激光器远场辐射方向图, (c) 模拟仿真整形后 2.7 THz 量子级联激光器远场辐射方向图和 (d) 实验测得整形后 2.7 THz 量子级联激光器远场辐射方向图

Fig. 3 (a) Structure diagram of the 2.7 THz QCL, (b) far field radiation pattern of the 2.7 THz QCL before the simulation shaping, (c) far field radiation pattern of the 2.7 THz QCL after the simulation shaping and (d) far field radiation pattern of the 2.7 THz QCL after the testing

基混频器叠加在一起,同时作为激光器的正极与肖特基混频器的阴极。该结构的优势是将激光器信号直接耦合入肖特基混频器,不需要额外的光学部件,使得接收机系统相对简化。但是,该集成相干探测器系统的噪声性能还较差。(3)中科院紫金山天文台、中科院上海技术物理所、法国 IEF 研究所和英国剑桥大学 Cavendish 实验室等合作采用基于“束缚态至连续态跃迁”的有源区结构和递变型光子异质结谐振腔的低功耗单模量子级联激光器,利用天线阵理论对太赫兹量子级联激光器辐射波束进行精确模拟仿真与整形,在机械脉冲管制冷机同一 4 K 温度平台集成了太赫兹量子级联激光器和超导热电子混频器。该方法极大地简化了系统复杂度,提高了系统的可靠性。基于量子级联激光器(QCL)的超导集成接收机技术的研究成果示于图 3。

2.2 太赫兹超导非相干探测器

2.2.1 超导相变边缘(TES)探测器^[16-20]

超导相变边缘探测器(TES)包含一层超导薄膜(典型器件结构如图 4),工作在正常态与超导态之间的一个很窄的温度区间内。在此温度区间,超导薄膜的电阻具有很高的温度灵敏度,在恒压偏置下吸收光子信号后引起电流的变化,并通过极低噪声贡献的超导量子干涉仪(SQUID)构成的电流放大器读出,从而实现背景极限的探测。恒压偏置和 SQUID 低噪声读出使得大规模超导 TES 探测器阵列的实现成为可能,应用于探测从毫米波一直到伽马射线的电磁波辐射,取得了巨大的成功。

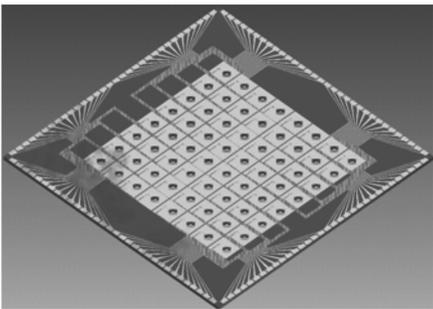


图 4 TES 探测器阵列结构图

Fig. 4 Structure of the TES array

的钼超导导线通上电流,测量在红外辐射下其电阻的变化,从而宣告了超导 TES 探测器的诞生。但是随后的发展遇到两个瓶颈,一是超导 TES 探测器的电阻很小,很难与高阻的 FET 放大器匹配。另一个困难是超导 TES 探测器具有非常窄的电阻转变温度区间,恒流偏置产生的正电热反馈使其很难使超导 TES 探测器位于转变区间内。SQUID 放大器具有非常低的噪声,其低电阻的特性使得与超导 TES 的匹配非常容易。另外超导 TES 探测器的偏置从恒流偏置改为恒压偏置,负电热反馈使得超导 TES 很容易处于转变区间内。这两个困难的克服使得超导 TES 探测器的发展速度骤然加快。SQUID 放大器的采用促使了多路读出复用技术的发展,大大降低了大规模超导 TES 探测器阵列的引线数目,从而加速了其发展进程。如今高达 1 万像元的 SCUBA-2,安装在 JCMT 望远镜上开展亚毫米波辐射的巡天观测。

随着天文学的发展,人们认识到除了追求更大规模的超导 TES 探测器阵列外,还需要同时观测不同频率的电磁波辐射,因此在同一个阵列上集成不同频段的超导 TES 探测器成为一种发展趋势,这就要求集成射频滤波器。另外宇宙微波背景辐射观测要求同时测量两个极化方向的辐射,因此双极化超导 TES 探测器成为研究的热点。加州大学 Berkeley 分校提出了双极化多频段的超导 TES 探测器,能够同时观测两个极化方向的不同频段的毫米波辐射。NIST 提出了一种双极化多频段的喇叭馈源超导 TES 探测器,将会应用到 ACTPol 项目上。荷兰 SRON 研制的极低热导超导 TES 探测器,NEP 达到 $10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$,将会应用于空间卫星计划 SPICA。

2.2.2 超导动态电感(KID)探测器

太赫兹超导动态电感探测器(MKIDs)实际上是一个由超导薄膜平面电感和平面电容组成的谐振腔,其谐振频率处于微波波段。当超导电感吸收太赫兹光子后,其表面阻抗产生变化,进而导致谐振腔频率与 Q 因子的变化。通过测量这些变化,可实现对太赫兹信号的探测,典型器件结构和工作原理如图 5 所示。

2003 年,JPL/Caltech 研究组首次实验演示了

1941 年,D. H. Andrew 首先尝试给一段绝热

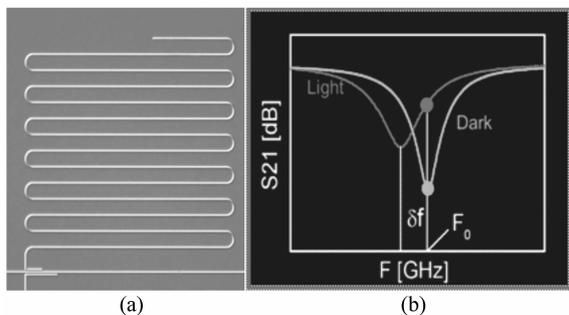


图 5 (a) MKIDs 探测器的单像元结构图和 (b) 工作原理示意曲线图

Fig. 5 (a) Structure of the one pixel MKIDs detector and (b) the diagram of the working principle

超导动态电感探测器。近年来,太赫兹超导 MKIDs 探测器技术得到了快速发展,特别是采用了更为简单的读出复用技术,即超宽带低温制冷低噪声放大器和超宽带高分辨率实时数字频谱仪。太赫兹超导 MKIDs 探测器在 300 mK 温区的灵敏度已达 $1 \times 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$,也易实现 1k 以上像元大规模阵列。CCAT 太赫兹天文计划(美国新十年天文规划推荐项目)预计将采用太赫兹超导 MKIDs 探测器。除 SCUBA-II 以外,近年来较小规模阵列的超导 MKIDs 探测器系统在一些地面望远镜上进行了初步试验观测^[21-23]。

在国内方面,中科院紫金山天文台通过与荷兰 TUDelft 大学以及日本理化学研究所(RIKEN)的合作研究,已开展了关于超导动态电感探测器的相关研究,并已成功研制了 1 024 像元的超导 MKIDs 探测器芯片,并初步测试了其在亚 K 温区的谐振特性^[24-25]。

3 太赫兹天文探测技术的发展趋势

3.1 太赫兹超导相干探测器

高能隙超导材料的引入可以提高超导 SIS 混频器的工作频率,但由于此类超导材料相干长度更短,使得势垒层制备难度增加。另外,由于特征电压的提高,相应地 J_c 也需要提高才能确保相对带宽不变。随着高能隙超导隧道结制备技术的提高和新材料的应用,特别是科学应用的推动,预期

高能隙超导 SIS 混频技术研究将会得到新的发展。

天文观测所需的时间与超导热电子混频器灵敏度的平方成反比。为了观察星系的精细结构,现代的巡天计划要求以很高的角分辨率扫描很大的天区,而太赫兹望远镜的观测效率与接收机波束成正比。与星系与恒星形成相关的许多谱线位于 2 THz 以上的高频段,对这些谱线的高频率分辨率观测将会提供给我们许多新的信息。因此 THz 谱线天文观测所需的超导热电子混频器正朝着更高灵敏度、更高频率和多波束方向发展。通过对超导热电子混频器机制的深入理解提高变频效率,同时优化外围的匹配电路和天线耦合结构降低信号的传输损耗,最终研制 2 THz 以上的超导热电子混频器,灵敏度全面突破 5 倍量子噪声极限。解决本振功率分配、直流偏置复用技术和宽中频集成,从而成功研制多波束超导热电子混频器。另外,探索更高临界温度的新超导材料,如 FeSeTe,研究其器件制备工艺和器件特性,有望实现更高工作温度下的高灵敏度和高达 10 GHz 的中频带宽,满足将来的空间应用需求。

多波束超导热电子混频器的还处于起步阶段,需要突破本振功率分配、宽中频集成和直流偏置复用等关键技术。在本振功率分配方面,平衡混频器可以大大提高本振功率的利用效率。近期紫金山天文台提出的波束分离器阵列实现本振功率分配,将以前单项元超导热电子混频器通过波束分离器透射的信号重新加以利用,继续分配给后续的超导热电子混频器,可以提高本振功率利用率。宽中频集成的最终目标是将低温低噪声放大器与超导热电子混频器在芯片层面集成,减小接收机体积的同时提高可靠性。由于我国在低噪声放大器方面不具有优势,因此中近期的目标是将超导热电子混频器和低噪声放大器分别集成,然后通过宽中频匹配电路实现互联。在直流偏置复用方面,提高超导热电子混频器的一致性,分析高频特性对工作点敏感度,从而通过简单的 2 根偏置线实现所有超导热电子混频器的偏置。

3.2 太赫兹超导非相干探测器

目前的发展趋势表明,超导 MKIDs 探测器技

术已成为太赫兹望远镜研制宽带连续谱阵列探测成像系统的首选,阵列像元数将突破1 k,灵敏度将达到背景极限。此外,MKIDs探测器阵列的读出技术,也将是下一步发展的重点研究方向。

超导TES探测器具有背景极限的灵敏度,在星系和恒星形成、宇宙微波背景辐射等领域具有重要的应用。我国拟建的南极5 m太赫兹望远镜,下一代设备有望安装大规模的超导阵列成像系统,要求1 000像元左右的超导TES探测器,工作在300 mK,NEP达到 $10^{-16} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。另外超导TES探测器阵列具有极高的灵敏度,能够被动探测成像,对人体无任何伤害,在安检领域具有广阔的前景。

详细研究亚K临界温度的超导薄膜的生长工艺,制备超导TES探测器,并通过硅刻蚀工艺降低超导TES探测器的热导,从而实现 $10^{-16} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的探测灵敏度。研究SQUID电流放大器的磁通锁定和时分或者频分复用技术。结合超导TES探测器和多路读出复用电路,成功研制1 000像元的超导TES探测器阵列成像系统,满足国内在天文、安检等领域的应用需求。

另外一个关键技术是多路复用读出技术,建议针对较成熟的时分复用和频分复用展开研究。掌握多路读出复用技术的原理,设计出实现方案,分别开发常温放大反馈电路和低温放大、寻址电路,实现1 000像元的读出复用。

通过这两方面技术的攻克,最终研制成功1 000像元的超导TES探测器阵列成像系统,满足近期内天文、安检等领域的应用需求。

参考文献:

- [1] IVISON R J, SMAIL I, BARGER J, *et al.*. The diversity of SCUBA-selected galaxies[J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2000, 315: 209-222.
- [2] PHILLIPSTG, KEENE J. Submillimeter astronomy[J]. *IEEE*, 1992, 80: 1662-1678.
- [3] ZMUIDZINAS J, RICHARDS P L. Superconducting detectors and mixers for millimeter and submillimeter astrophysics [J]. *IEEE*, 2004, 92: 1598-1616.
- [4] Kraus J D. Radio Astronomy, 2nd ed. [D]. Powell, OH: Cygnus-Quasar Books, 1986.
- [5] TUCKER J R, FELDMAN M J. Quantum detection at millimeter wavelengths[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, 57: 1055-1113.
- [6] 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 Trans. Microwave Theory Tech.*, 2006, 54: 547-557.

4 结束语

太赫兹波段占有宇宙微波背景(CMB)辐射以后宇宙空间近一半的光子能量,它是宇宙中冷暗物质辐射的重要波段,河系和大多数旋涡星系有一半以上的能量是由该频段的辐射加以释放;另外,由于星际介质遮挡较弱,太赫兹波段适合观测尘埃云和分子云内部的星际介质和恒星的物理状态。因此,该波段在天文学研究中具有不可替代的作用,因此太赫兹天文学的研究,具有极其重要的科学意义。

近年来,人们逐渐认识到太赫兹波段在天文学、大气科学、物理学、材料科学、生命科学、信息技术等领域的重要科学意义与潜在应用前景。但由于太赫兹技术的严重缺乏以及地球大气对太赫兹辐射的强吸收,人们对太赫兹电磁辐射特性依然知之甚少,该波段至今还是一个有待全面研究和开发的频率窗口。

基于低温超导器件的探测技术是目前太赫兹频段最灵敏的探测手段,本文系统介绍了超高灵敏度太赫兹超导探测技术的发展,包括以超导隧道结混频器(SIS)和超导热电子混频器(HEB)为代表的太赫兹相干探测器,以及以超导动态电感探测器(MKIDs)和超导相变边缘探测器(TES)为代表的非相干探测器的研究。在介绍了发展现状的基础上,还展望了未来的发展趋势和方向,对今后我国太赫兹天文探测技术的发展具有一定的参考意义。

- [7] KARPOV A, MILLER D, RICE F, *et al.*. Low noise 1THz 1.4THz mixers using Nb/Al-AlN/NbTiN SIS junctions[J]. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2007, 17:343-346.
- [8] TONG C Y E, BLUNDELL R. Theory of series-connected distributed SIS mixers with ultra-wide instantaneous bandwidth [C]. Proceedings of 17th Int. Space Terahertz Technol. Symp., Harvard, USA, 2006:35-38.
- [9] LI J, TAKEDA M, WANG ZH, *et al.* Low-noise 0.5 THz all-NbN superconductor-insulator-superconductor mixer for sub-millimeter wave astronomy[J]. *Appl. Phys. Letts.*, 2008, 92:222504.
- [10] LI J, TAKEDA M, WANG Z H, *et al.*. Characterization of the mixing performance of all-NbN superconducting tunnel junctions at 0.5 THz[J]. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2009, 19(3):417-422.
- [11] GERSHENZON E M, GOLTSMAN G N, GOGIDZEI G, *et al.*. Millimeter and submillimeter range mixer based on electronic heating of superconducting films in the resistive state[J]. *Sov. Phys. Superconductivity*, 1990, 3:1582-1597.
- [12] PROBER D E. Superconducting terahertz mixer using a transition-edge microbolometer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 62(17):2119-2121.
- [13] REN Y, HOVENIER J N, HIGGINS R, *et al.*. High-resolution heterodyne spectroscopy using a tunable quantum cascade laser around 3.5 THz[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98:231109.
- [14] REN Y, HOVENIER J N, HIGGINS R, *et al.*. Terahertz heterodyne spectrometer using a quantum cascade laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97:161105.
- [15] REN Y, GAO J R, *et al.*. Heterodyne gas cell measurements at 2.9 THz using a quantum cascade laser as local oscillator [J]. *SPIE*, 2010, 7741:774118-7.
- [16] MARNIEROS S, BERGE L, JUILLARD A, *et al.*. Low temperature specific heat of NbSi Anderson insulator measured by cryogenic bolometry[J]. *Physica B*, 1999, 259-261:862-863.
- [17] PAJOTI F, PRELE D, ZHONG J Q, *et al.* NbSi TES array and readout; development and characterization[J]. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2011, 21(3):192-19.
- [18] MARTINO J, PRELE D, PIAT M, *et al.*. Characterization of NbSi TES bolometers; preliminary results[J]. *J. Low Temp. Phys.*, 2012, 167(3/4):176-181.
- [19] ZHANG W, ZHONG J Q, MIAOW, *et al.*. Electrical characteristics of superconducting Ti Transition edge sensor[J]. *J. Low Temp. Phys.*, 2015, 181(5/6):1-6.
- [20] ZHANG W, ZHONG J Q, MIAO W, *et al.*. Characterization of a superconducting NbSi Transition edge sensor for TESIA [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, 25(3):2100204.
- [21] MAZIN B A. Microwave kinetic inductance detectors[D]. California:California Institute of Technology, 2004.
- [22] HOLLAND W. Millimeter, submillimeter, and far-infrared detectors and instrumentation for astronomy[J]. *SPIE*, 2010, 7854:78540U.
- [23] BASELMANS J. Kinetic inductance detectors[J]. *J. Low Temp. Phys.*, 2012, 167(3):292-304.
- [24] SHI SH C, ZHANG W, LI J, *et al.*. A THz superconducting imaging array developed for the DATE5 Telescope[J]. *J. Low Temp. Phys.*, 2016, 184(3):1-5.
- [25] LI J, YANG J P, LIN ZH H, *et al.*. Development of an 8 × 8 CPW microwave kinetic inductance detector(MKID) Array at 0.35 THz[J]. *J. Low Temp. Phys.*, 2016, 184(1):103-107.

作者简介:



李 婧(1978—),女,山东青岛人,博士,项目研究员,2009年于中科院紫金山天文台获得博士学位,主要从事射电天文、超导电子学方面的研究。E-mail:lijing@pmo.ac.cn