

太赫兹超导探测器与宇宙探测

缪巍任远张文李婧史生才

(中国科学院紫金山天文台 210033)

近年来,太赫兹天文学备受关注,已成为现代天文学中引人瞩目的研究领域之一。其主要原因在于太赫兹波段为科学家提供了全新而激动人心的探索宇宙的途径,开启了我们对于宇宙更深层次的认知。首先,太赫兹波段(0.1~10 THz)携带了除宇宙微波背景辐射以外近一半的光子能量,其对应的黑体辐射温度范围为5~500 K,特别适合用于观测处于形成阶段的冷暗天体,为深入地理解星系形成与演化、恒星及行星形成等前沿科学问题提供了独特的观测手段。其次,太赫兹波段具备穿透星际尘埃的特殊能力,使其能够直接观测到遥远宇宙中的天体,这为我们解开宇宙演化之谜提供了独特的视角,不仅有助于理解极高红移早期宇宙的形成和演化,同时为研究宇宙大尺度结构提供了关键信息。另外,太赫兹波段存在丰富的分子转动谱线和原子精细结构谱线,同时许多有机分子谱线也位于太赫兹波段,这些谱线对于研究星际介质物质及能量循环以及宇宙生命起源等方面具有重要意义。总体上,太赫兹波段天文观测在天体物理和宇宙学研究中扮演着不可替代的角色,太赫兹天文学正在迅速发展成为现代天体物理的前沿研究领域之一。

太赫兹天文观测依赖于高灵敏度的探测器技术,而当前在太赫兹波段的微弱电磁信号探测方面,低温超导探测器技术处于领先地位,对宇宙学和天体物理等领域的研究起着日益关键的作用。目前,国际主流的低温超导探测器技术涵盖超导隧道结(Superconductor Insulator Superconductor, SIS)混频器技术^[1]、超导热电子(Hot Electron Bolometer, HEB)混频器技术^[2]、超导动态电感(Kinetic Inductance Detector, KID)探测器技术^[3]以及超导相变边缘(Transition Edge Sensor, TES)探测器技术^[4]。前两

种超导探测器技术主要专注于太赫兹波段高光谱分辨率探测,而后两种技术则主要致力于大规模成像及宽带成像光谱探测。本文将深入介绍这四种超导探测器技术,并详细探讨它们在太赫兹天文观测中的应用。此外,文中还将关注最近涌现的太赫兹探测器技术进展,如超导体与二维石墨烯材料相结合的热电子探测器技术^[5]和约瑟夫森结探测器技术^[6],这些新技术的出现为太赫兹波段天文观测开辟了新的可能性,有望为未来的天文研究提供更多创新性的工具和方法。

一、太赫兹超导相干探测器及天文应用

相干探测器(coherent detector)是利用混频原理将输入信号与本振参考信号进行差频,从而实现信号的相干检测,能够同时获取信号的幅度和相位信息。在太赫兹波段,目前最灵敏的相干探测器主要包括基于低温超导体(如Nb和NbN)的超导SIS混频器和超导HEB混频器。其中,超导SIS混频器主要工作在1 THz以下频段,而超导HEB混频器主要应用于1 THz以上频段。相干探测器的灵敏度通常用噪声温度来表示,受限于海森堡不确定性原理,相干探测器的灵敏度存在上限,即所谓的量子极限($hf/2k_B$, h 为普朗克常数, f 为工作频率, k_B 为玻尔兹曼常数)。目前,超导SIS混频器和超导HEB混频器的灵敏度均已逐渐接近量子极限,比基于半导体器件(如肖特基二极管)的低温制冷混频器高一个量级以上。在天文观测中,相干探测器主要应用于高频谱分辨率($f/\Delta f$ 大于 10^6)的分子转动谱线和原子精细结构谱线的探测(spectroscopy)以及具备高空间分

分辨率的天线干涉阵(interferometry)。

1. 超导 SIS 混频器技术

超导 SIS 混频器是由两块超导体及其之间的薄绝缘层(通常为几十纳米厚的势垒层)构成,如图 1(a)所示。其工作原理基于光子辅助准粒子隧穿效应,即超导 SIS 结构因吸收光子后,产生的准粒子在势垒层中实现隧穿。这一效应最早是被 Dayem 和 Martin 实验观察到,并由 Tien 和 Gordon 解释了其物理原理。尽管这一现象的发现早于约瑟夫森效应,但直到 20 世纪 70 年代末才开始了超导 SIS 混频器的实验和理论研究。这其中的重要贡献包括: Tucker 和 Feldman 建立了基于光子辅助准粒子隧穿效应的量子混频理论^[1],并预言了超导 SIS 混频器噪声可达量子噪声(hf/k_B)、可实现变频增益以及具有负阻效应等重要结果; Bell 实验室的 Gurvitch 等人发明了基于标准光刻工艺的 Nb/Al-AlO_x/Nb 超导 SIS 混频器制备工艺,使得超导 SIS 混频器芯片制备的可靠性和质量得到了大幅提升。后来,超导 SIS 混频器片上集成谐振和无调谐超宽带混频腔两项关键技术的突破使得超导 SIS 混频器得以进一步发展。超导 SIS 混频器片上集成谐振技术主要解决了超导隧道结电容对高频信号的短路问题,而无调谐超宽带混频腔技术则使得超导 SIS 混频器在太赫兹望远镜中应用更为便捷,特别是在干涉阵中的应用获得了可能性。超导 SIS 混频器片上集成谐振技术主要包括并联电感型、串联电感型和并联双结型。与另外两种集成谐振技术相比,并联双结型具有结构简单、输入阻抗适中、频率响应相对平坦,以及良

好的射频及中频耦合效率。图 1(b)展示了并联双结型超导 SIS 混频器芯片实物图。目前,基于 Nb 材料的超导 SIS 混频器灵敏度已突破 3~5 倍量子噪声,中频瞬时带宽接近 20 GHz。由于超导 SIS 混频器的工作频率上限主要受限于超导材料的能隙频率, Nb 超导 SIS 混频器的工作频率通常低于 0.7 THz。近年来,人们广泛开展了高能隙材料的超导 SIS 混频器技术研究。在这一领域, Caltech/JPL 研究小组专注于 NbTiN 超导 SIS 混频器技术,并已成功实现了迄今为止频率最高的超导 SIS 混频器,覆盖 1.0~1.4 THz。另一方面, NiCT/NAOJ/PMO 研究小组致力于 NbN 超导 SIS 混频器的研发,并已成功研制出噪声温度优于 7 倍量子噪声的全 NbN 超导 SIS 混频器^[7]。

目前,超导 SIS 混频器已广泛应用于太赫兹天文观测,并在此领域取得了许多重要成果。2014 年,世界最大太赫兹天文望远镜干涉阵 ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)采用超导 SIS 混频器作为其探测器终端,成功地捕获了围绕位于金牛座的年轻 T Tauri 星 HL Tauri 的原行星盘图像^[8]。当时,大多数理论都没有预料到在这样一个年轻(10 万至 100 万岁)的系统中会形成行星。因此,新的数据激发了关于原行星发展的新理论。随后, ALMA 持续观测到了各种恒星周围的原行星盘,揭示了行星形成的细节,并提供了对这些盘结构和物质分布的高分辨率图像,从而有助于我们理解太阳系和其他恒星系的形成过程。2019 年,事件视界望远镜 EHT(Event Horizon Telescope)发布了人类历史上第一张真实的黑洞照片^[9]。图 2 是事件视界望远镜和拍摄的 M87 星系中心黑洞照片。EHT 观测集

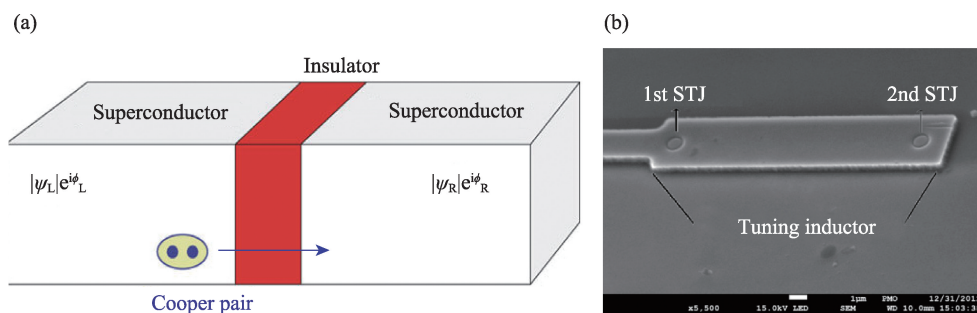


图 1 (a)超导 SIS 混频器结构示意图;(b)并联双结型超导 SIS 混频器芯片实物图

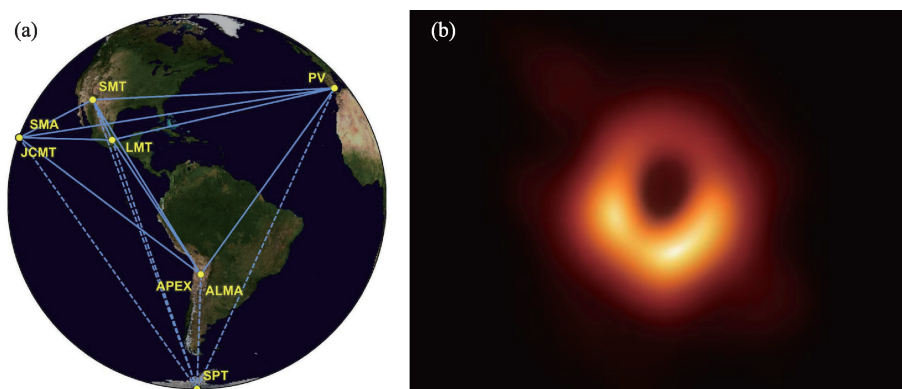


图2 (a)事件视界望远镜(EHT);(b)拍摄的M87星系中心黑洞照片

合了横跨四大洲的8台太赫兹天文望远镜,其中包括 JCMT(James Clerk Maxwell Telescope)、APEX (Atacama Pathfinder Experiment)、IRAM(Institut de Radioastronomie Millimétrique)、LMT(Large Millimeter Telescope)、SPT(South Pole Telescope)、SMT(Submillimeter Telescope)六台单天线太赫兹天文望远镜,以及 SMA(Submillimeter Array)与 ALMA 两台太赫兹天文望远镜干涉阵。EHT 以甚长基线干涉技术 VLBI(Very Long Baseline Interferometer)结合世界各地的射电望远镜,使许多相隔数千千米的独立天线能互相协调、同时观测同一目标并记录下数据,形成一口径等效于地球直径的虚拟望远镜,将望远镜的角分辨率提升至前所未有的20微角秒。上述太赫兹天文望远镜及干涉阵的探测器终端均采用了超导 SIS 混频器。此外,迄今为止最大的红外线太空望远镜 Herschel 装备了一系列仪器,其中包括 HIFI(Heterodyne Instrument for the Far-Infrared)模块。该模块涵盖了7个波段,其中1~5波段均采用了超导 SIS 混频器,覆盖0.48~1.28 THz 频率范围。其重要成果之一是深入探索了水分子在宇宙中的角色,发现大部分水分子辐射源自温暖区域、原恒星外向流以及受激波扰动气体,证明了水分子是早期恒星形成阶段的重要冷却剂。此外,观测还揭示了从分子云到行星形成阶段都存在水分子,有助于我们深入理解水在宇宙中的起源和演化过程,为研究星际介质中的物质循环和行星形成提供了重要信息。总体来看,超导 SIS 混频器因其高灵敏度

和宽中频瞬时带宽,几乎成为地面上在建及规划的1 THz 以下频段大型望远镜高光谱分辨率探测终端的首选。

国内方面,中国科学院紫金山天文台于1998年为青海13.7 m毫米波天文望远镜研制了3毫米波段超导 SIS 混频接收机,其灵敏度较之同频段半导体混频接收机提高了一个量级,使得我国天文观测从此拥有了国际先进的超导探测器。随后,青海13.7 m毫米波天文望远镜的探测器终端升级为多谱线和多波束超导 SIS 混频接收机,进一步提升了望远镜综合性能。目前,该望远镜正在进行银道面分子谱线巡天计划“银河画卷”二期项目。近年来,中国科学院紫金山天文台正为我国载人航天工程2米多功能光学设施研制高灵敏度太赫兹探测模块。该模块将采用高能隙 NbN 超导 SIS 混频器作为探测器终端,覆盖0.41~0.51 THz 的频率范围,预计将于2026年底发射。

2. 超导 HEB 混频器技术

超导 HEB 混频器是一种热探测器,其主要组成部分包括一个纳米尺度厚的超导微桥(如 Nb、NbN 或 NbTiN)和一个耦合太赫兹电磁波的波导电路或准光学天线。超导 HEB 混频器通常工作在低于超导微桥临界转变温度(典型值为10 K)一半的温度范围内,原理上属于非色散探测器,即频率不相关^[2]。图3(a)和(b)分别展示了双槽天线耦合的超导 HEB 混频器芯片实物图和超导 HEB 混频器的热输运过

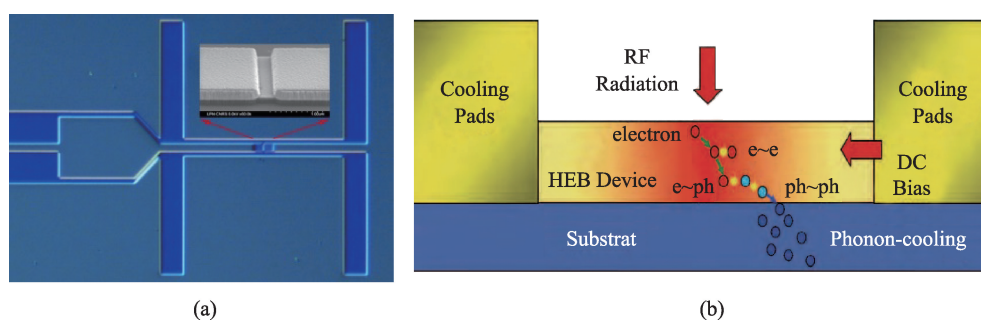


图3 (a)双槽天线耦合的超导HEB混频器芯片实物图;(b)超导HEB混频器中热输运过程

程。当超导微桥吸收太赫兹光子后,超导微桥中的Cooper对会被拆散,导致电子温度首先升高,然后通过电子-声子相互作用或热电子扩散进行冷却。低温环境下,由于存在较长的弛豫时间,超导微桥中电子温度高于声子温度,这就形成了热电子效应。根据热耗散方式,超导HEB混频器可以分为扩散制冷型(diffusion cooled)和声子制冷型(phonon-cooled)两种,前者超导微桥长度更短,而后者超导微桥厚度更薄。迄今为止,声子制冷型超导HEB混频器大都采用NbN和NbTiN超导薄膜,并表现出更出色的太赫兹混频特性。由于超导HEB混频器通常在1 THz以上频段工作,实际天文观测往往需要更宽的中频瞬时带宽,这一直是超导HEB混频器研究的一个重要方向。近年来,国际上一些研究组通过结合两种热电子制冷方式来拓展超导HEB混频器的中频瞬时带宽。例如,俄罗斯莫斯科师范大学Goltsman研究组最近发现基于两种热电子制冷方式的超导HEB混频器的中频瞬时带宽可超过7 GHz,高于常规的3~5 GHz。另一种拓展中频瞬时带宽的方法是采用高临界温度超导HEB混频器。最近,瑞典Chalmers理工大学研究组等采用6 nm厚高临界温度超导MgB₂薄膜,实现了11 GHz的中频瞬时带宽。超导HEB混频器的另一个重要研究方向是实现更高频率和更接近量子极限灵敏度,这需要制备更高质量的超导HEB混频器芯片、更深入理解微纳尺度超导HEB混频器中太赫兹波输运与吸收特性等,以及采用更高精度的测量方法。俄罗斯莫斯科师范大学Goltsman研究组和荷兰SRON/TU Delft大

学Gao/Klapwijk研究组分别采用in-situ工艺和引入中间层方法,实现了更高质量的超导HEB混频器芯片制备,在2.5 THz和5.3 THz频段实现了噪声温度突破5倍量子噪声的超导HEB混频器。此外,超导HEB混频器中频输出功率稳定性也是国际上多个研究组致力研究的一个重要方向。美国哈佛-史密松天体物理中心Edward Tong提出了注入低频微波信号方法、瑞典Chalmers理工大学提出了平衡倍频器方法,以及SRON/TU Delft大学提出了本振功率反馈法三种方法。

国内方面,中国科学院紫金山天文台自2000年起与俄罗斯莫斯科师范大学合作,率先开展了超导HEB混频器技术研究。在超导HEB混频器物理机理研究方面,提出了超导HEB混频器中太赫兹波非均匀吸收的概念,并通过实验揭示了超导HEB混频器中磁涡旋运动导致电阻变化和磁涡旋态密度调制混频的新机制^[10],建立了超导HEB混频器的首个频率相关热点模型,较完美地解释了超导HEB混频器在能隙以下和以上频率的近平衡态输运和高频特性,为研制高灵敏度和超宽带超导HEB混频器打下了基础。此外,采用更精确的电流扫描噪声温度测试方法,研究了单一超导HEB混频器在1~6 THz频率范围内的噪声特性,得到了更精确的量子噪声因子,实现了超导HEB混频器中量子噪声贡献的定量分析。在超导HEB混频器特性研究方面,中国科学院紫金山天文台率先实现了4 K闭环制冷环境下的超导HEB混频器实验,取得了与常规液氮制冷相当的混频性能,证认了4 K闭环制冷环境下超导

HEB混频器长周期工作的良好性能。此外,基于频率相关热点模型模拟仿真发现,超导HEB混频器的噪声特性与器件临界转变温度存在普适规律,并获得实验验证。针对中国南极昆仑站天文台太赫兹望远镜的应用需求,成功研制了1.4 THz频段迄今国际上灵敏度最高的超导HEB混频器,实测超导HEB混频器噪声温度优于5倍量子噪声^[11]。研制过程中,采用了电子束曝光一次性形成接触电极和平面天线技术,有效降低了超导HEB混频器射频传输损耗。近年来,中国科学院紫金山天文台采用物理光学与几何光学相结合方法,设计并优化了中红外超宽带平面天线,并采用锗基介质透镜与砷化镓基平面天线耦合技术,实现自由空间中红外辐射与超导微桥的高效耦合。通过这些技术手段,首次揭示了超导HEB混频器在中红外频段的射频噪声和量子噪声贡献等特性,成功研制了国际最高频率(28.1 THz)的准光天线耦合型高灵敏度超导HEB混频器。除此之外,采用气体吸收谱线(如甲醇分子谱线)与高速可调光阑双路反馈控制,成功突破了量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)同步稳幅锁频的技术瓶颈,研制了兼具高光谱分辨率与长有效积分时间的集成超导HEB/QCL混频接收机,实现了甲醇气体特征谱线的实验室高分辨率探测。另外,中国科学院紫金山天文台采用了“束缚态至连续态跃迁”有源区结构的低功耗单模QCL,研制了迄今最高集成度超导HEB/QCL混频接收机,2.5 THz频段实测接收机噪声温度优于800 K,达到7倍量子噪声。

在太赫兹天文观测领域,超导HEB混频器也得到了广泛应用,并取得了许多重要成果。2005年,美国哈佛-史密松天体物理中心在RLT(Receiver Lab Telescope)上成功安装了超导HEB混频器,实现了1.3 THz($J=11\sim10$)和1.5 THz($J=13\sim12$)频段的CO谱线观测。这一成就标志着超导HEB混频器在太赫兹波段天文观测中的最早应用。此外,红外线太空望远镜Herschel的HIFI模块在高频段探测中采用了超导HEB混频器。通过这一装置,科学家们首次发现了 H_2O^+ 、 H_2Cl^+ 、 SH^+ 、 HCl^+ 等重要氢化物。这些氢化物的发现不仅揭示宇宙中星际物质的组成,也为星际化学网络中大分子的形成提供了基础。2019年,美国NASA和德国太空总署DLR合作研制的平流层红外天文台SOFIA(Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy)利用超导HEB混频器取得了重要突破,成功探测到宇宙中形成的 HeH^+ 分子^[12],如图4所示。作为宇宙中最早形成的分子之一, HeH^+ 的探测为我们揭示宇宙早期化学过程提供了宝贵线索,印证了控制 HeH^+ 形成的化学反应网络的可靠性,尤其是在相关的辐射复合和解离复合反应的速率方面,这次探测结果为理解宇宙化学提供了关键信息。另外,欧美等新提出的气球计划GUSTO(Galactic/Extra-Galactic ULDB Spectroscopic Terahertz Observatory)和ASTHROS((Astrophysics Stratospheric Telescope for High Spectral Resolution Observations at Submillimeter-wavelengths),以及空间计划OASIS(Orbiting Astronomical Satellite for Investigating Stellar Systems)也都采用超导HEB混频

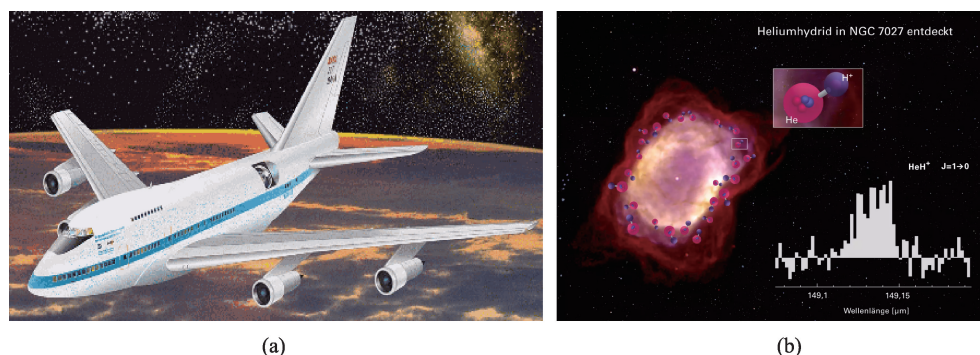


图4 (a)SOFIA平流层红外天文台;(b)SOFIA探测到的宇宙中最早形成的 HeH^+ 分子

器作为核心探测器终端。

二、太赫兹超导非相干探测器及天文应用

非相干探测器(incoherent detector)是一种专门用于检测信号幅度信息而无法获取信号相位信息的探测器。这种探测器主要应用于连续谱观测和中低频率分辨率($f/\Delta f$ 小于 10^3)的谱线观测。非相干探测器的灵敏度常用等效噪声功率(Noise Equivalent Power, NEP)来衡量,但其最终灵敏度会受到信号或背景的光子噪声的限制。目前,太赫兹波段最灵敏度非相干探测器包括超导 TES 探测器和超导 KID 探测器,这两种探测器均能实现背景极限探测灵敏度,并被广泛应用于太赫兹天文观测,如宇宙微波背景(Cosmic Microwave Background, CMB)观测等。近年来,基于二维石墨烯材料的新型探测器蓬勃发展,尤其是超导体与二维石墨烯材料相结合的探测器备受关注,这些超导体/石墨烯新型探测器也能实现背景极限探测灵敏度。

1. 超导 TES 探测器技术

超导 TES 探测器是一种热探测器^[3],通常由吸收元件、温度传感器、热弱连接体和热沉等组成。入射信号被吸收元件吸收后,吸收元件的温度会发生变化,随后温度传感器用于检测并记录这一温度变化。图 5(a)和(b)分别展示了超导 TES 探测器芯

片实物图和超导 TES 探测器中热输运过程。超导薄膜具有强电阻-温度非线性特性,在转变温度附近,超导薄膜的电阻热敏系数($\alpha=(T/R)(dR/dT)$)特别高,因此采用超导薄膜作为温度传感器可以获得很高的灵敏度。目前,超导 TES 探测器的温度传感器采用的超导薄膜大致分为三种类型:单层超导薄膜(如 Ti、W、Hf 等)、双层超导薄膜(如 TiAu、MoCu 等)和合金超导薄膜(如 AlMn、NbSi 等)。其中,单层超导薄膜通常通过调整薄膜厚度或采用烘烤(baking)等方法来调节临界温度,双层超导薄膜则是通过临近效应来调控临界温度,而合金超导薄膜是通过调整两种材料的配比来实现临界温度的精确调控。基于这些超导薄膜的超导 TES 探测器,其临界温度通常为 0.1~0.5 K。在 0.1 K 温区,超导 TES 探测器的噪声等效功率可达 10^{-19} W/Hz^{0.5} 量级。此外,超导 TES 探测器的饱和功率一般在 1~20 pW 之间,响应时间为 1~10 ms。为了实现高灵敏度的超导 TES 探测器,除了探测器自身具有高灵敏度外,还需要实现辐射信号与探测器之间的高效耦合。在太赫兹波段,超导 TES 探测器的辐射耦合方式主要包括金属喇叭型、集成透镜型,以及相控阵天线型,这些辐射耦合方式已广泛应用于太赫兹超导 TES 探测器的研制,并在提高探测器的信噪比和灵敏度方面发挥了重要作用。随着太赫兹技术的不断发展,还有许多新型的耦合方式(如背对背喇叭技术)在研究和应用中不断涌现,为超导 TES 探测器的研制提供了

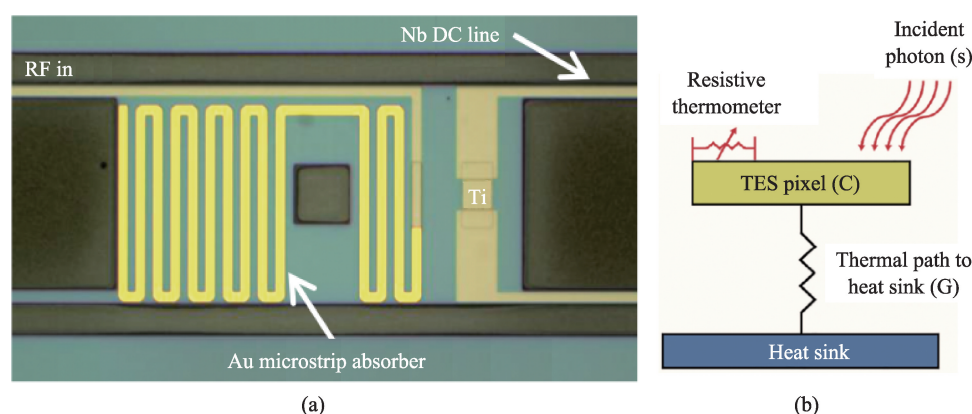


图 5 (a)超导 TES 探测器芯片实物图;(b)超导 TES 探测器中热输运过程

更多可能性。

超导 TES 探测器的发展可以追溯到 20 世纪 50 年代,然而其进展一直较为缓慢。主要原因在于超导 TES 探测器的正常态电阻极低,仅为几欧姆甚至更低,难以与场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)放大器相兼容。近年来,得益于超导量子干涉器(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)电流放大器多路读出复用技术的不断进步,包括时分复用(Time-division multiplexing, TDM)、码分复用(Code-division multiplexing, CDM)、低频频分复用(Frequency-division multiplexing, FDM),以及微波频分复用(Microwave SQUID multiplexing, μ MUX)等技术的发展,超导 TES 探测器实现了快速发展。目前,超导 TES 探测器的像元数已突破 10k 量级,被广泛应用于全球已建及规划中的宇宙微波背景及原初引力波探测计划,即 CMB B 模偏振探测。图 6 给出了 CMB 的温度和极化能谱,其中 CMB 极化被分解为无旋 E 模和无散 B 模,而 r 量化了标量到张量比率,也就是 B 模相对于温度能谱的大小。原初引力波探测计划包括 BICEP(Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization)、ACTPol (Atacama Cosmology Telescope Polarimeter)、SPIDER (Suborbital Polarimeter for Inflation Dust and the Epoch of Reionization)等项目。最近,美国天文学十年计

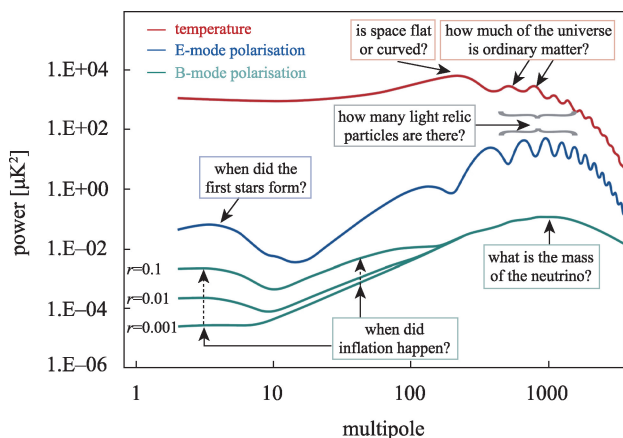


图6 宇宙微波背景(CMB)的温度和极化能谱,其中 CMB 极化被分解为无旋 E 模和无散 B 模, r 量化了标量到张量比率,即 B 模相对于温度能谱的大小

划(Astro2020)将宇宙微波背景探测(CMB-S4)^[13]列入优先支持计划,在南美智利和南极共规划了 18 台天文望远镜用于宇宙微波背景探测,而超导 TES 探测器是这些天文望远镜的首选探测器。值得一提的是,除了宇宙微波背景(CMB)及原初引力波探测计划,超导 TES 探测器在高性能天体物理(如 Athena)、暗物质探测、量子信息、基础物理等领域也具有广泛应用前景。

国内方面,中国科学院紫金山天文台率先开始了太赫兹超导 TES 探测器技术的研究,并提出了一种新型的超导 TES 探测器电路拓扑结构,即基于单层超导钛薄膜的悬臂梁支撑型超导 TES 探测器。中国科学院紫金山天文台利用预蒸镀膜法制备了高质量、临界温度可控的超导 Ti 薄膜制备,并成功研制了面向原初引力波探测的 0.22 THz 频段 8×8 像元超导 TES 探测器芯片^[14]。实测结果显示,超导 TES 探测器的光学等效噪声功率为 $1 \times 10^{-16} \text{ W/Hz}^{0.5}$,达到了地面背景极限探测灵敏度。近期,中国科学院高能物理研究所正牵头建设阿里原初引力波探测 (Ali CMB Polarization Telescope, AliCPT) 望远镜,旨在北半球开展原初引力波探测。该望远镜的第一代超导 TES 探测器将由美国斯坦福大学等合作伙伴协助研制,而下一代超导 TES 探测器则将实现自主研制。除了中国科学院紫金山天文台和高能物理研究所,清华大学和中国科学技术大学等也开展了超导 TES 探测器技术研究,这些研究为未来的天文观测和高能物理实验打下了关键技术基础。

2. 超导 KID 探测器技术

超导 KID 探测器是由美国加州理工学院 Zmuidzinas 研究组于 2003 年首次提出的一种太赫兹成像探测器,属于光子探测器^[4]。它由超导薄膜平面电感和平面电容组成的高 Q 谐振腔,其谐振频率位于微波波段。当太赫兹或更高能的光子入射到超导电感上时,会导致其表面阻抗发生变化,进而引起微波谐振频率和 Q 因子的变化。通过测量这些变化,可以实现对太赫兹或更高能光子信号的

探测。图7展示了超导KID探测器芯片实物图、等效电路图,以及有无辐照时 S_{21} 响应特性。在谐振器结构方面,超导KID探测器通常采用共面波导结构,能够传输准TEM模式电磁波,且不具有截止频率。常见的共面波导超导KID探测器包括四分之一波长短路谐振器和半波长开路谐振器。设计中,通常要求光子吸收产生的准粒子集中在谐振器中高电流密度的位置,而光子吸收可通过硅透镜天线耦合来实现。共面波导超导KID探测器主要工作在1 THz以下频段。在更高频段,由于硅透镜天线尺寸的减小,会导致光学效率下降以及加工难度增加。为了解决这一问题,一种方法是采用集总超导KID探测器。集总超导KID探测器由集总电感和集总交指电容构成的谐振器,其中集总电感负责吸收光子信号。集总超导KID探测器沿电感长度方向没有电流变化,因此可以排列成耦合到自由空间的光子吸收区域,在减小探测器尺寸和集成超大规模像元阵列方面具有更大优势。

超导KID探测器的问世引发了国际上众多研究团队对其物理机理和应用技术进行了深入研究。Mazin等研究人员探讨了超导KID探测器薄膜厚度对噪声和灵敏度的影响,Gao等人揭示了其中存在的过剩相位噪声,即薄膜与介质界面间的两能级系统噪声,Devisser等人对硅基铝膜超导KID探测器的准粒子产生复合噪声及光学噪声等效功率进行了测量。超导KID探测器备受青睐的原因在于采用了平面制备工艺和频分复用读出技术、具有

超高的灵敏度,以及易构建类似于CCD相机的大规模像元阵列等其他低温探测器无法比拟的优势。目前,超导KID探测器已被广泛应用于已建和规划中的太赫兹望远镜,用于太赫兹天文观测。例如,法国为主研制的NIKA(Néel Iram Kids Array)相机^[15]采用了超导KID探测器,于2016年10月安装到西班牙30米IRAM(Institut de Radioastronomie Millimétrique)太赫兹天文望远镜,成功实现了太赫兹天文探测,是迄今最成功的超导KID探测器天文应用。此外,美国加州理工学院的MUSIC(MULTi-wavelength Sub-millimeter Inductance Camera)项目成功研制了2304像元的超导KID探测器阵列,将应用到CCAT-prime(Cerro Chajnantor Atacama Telescope)、LCT(Leighton Chajnantor Telescope)等太赫兹天文望远镜。而欧洲雄心勃勃的A-MKID项目计划研制21600像元的超大规模超导KID探测器阵列,是目前国际上最大的太赫兹成像探测器阵列,将安装于智利阿塔卡马沙漠的APEX(Atacama Pathfinder Experiment)太赫兹天文望远镜上进行测试。此外,日本主导的原初引力波探测LiteBIRD空间望远镜也将超导KID探测器列为候选探测器终端。而美国加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校的Mazin团队正在致力于研制光学、近红外波段的超导KID探测器阵列,其中包括计划安装于5.1米海尔望远镜的DARKNESS(the DARK-speckle Near-infrared Energy-resolving Superconducting Spectrophotometer)、8米萨巴鲁望远镜的MEC(MKID Exo-

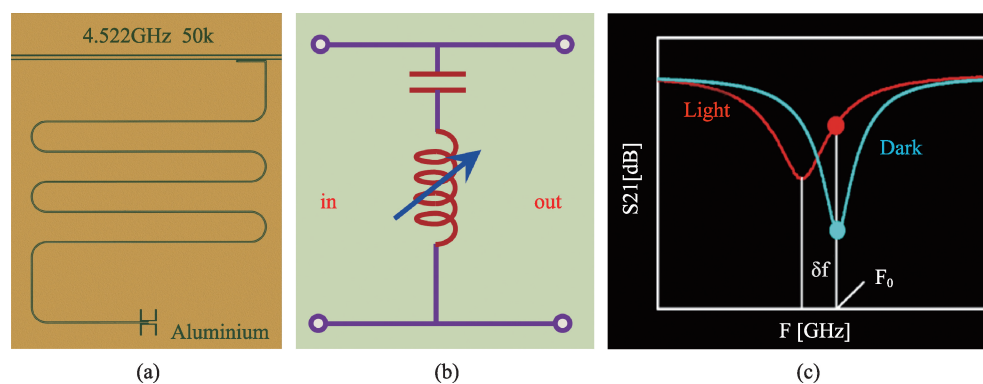


图7 (a)超导KID探测器芯片实物图;(b)超导KID探测器等效电路图;(c)有无辐照时超导KID探测器的 S_{21} 响应特性

planet Camera), 以及 10 米凯克望远镜的 KRAKENS (the Keck Radiometer Array using KID ENergy Sensors)。在 SuperCDMS (Cryogenic Dark Matter Search) 项目中, 超导 KID 探测器还被用作寻找 WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) 的探测器, 通过探测 WIMPs 与原子核的弹性碰撞产生的电离效应和晶格振动信号来寻找暗物质。

近年来, 基于超导 KID 探测器的单片集成光谱探测器也呈现蓬勃发展。在 20 世纪 70~80 年代, 曾出现过一种流行的射电天文频谱仪, 被称为 Filter Bank, 它是一种滤波器阵列, 工作在微波波段, 中心频率不同但带宽相同。然而, 由于其性能受限, Filter Bank 频谱仪很快被声光频谱仪以及结合了高速模拟/数字转换器和海量现场可编程门阵列的数字实时快速傅里叶变换频谱仪所取代。借鉴 Filter Bank 的概念, 欧美几个研究团队提出了基于超导 KID 探测器的单片集成光谱探测器 (On-Chip Spectrometer), 如 SuperSpec 和 DESHIMA (Deep Spectroscopic High-redshift Mapper)。实现这一新型频谱探测技术的核心是将具有低损耗、高选择度的太赫兹波段超导带通滤波器与高灵敏度、易于频分复用的超导 KID 探测器结合起来。换言之, 一个单单元超宽带光谱探测器在单一芯片上集成了超宽带平面天线、超导滤波器阵列和超导 KID 探测器阵列。由于采用了单一芯片的相同超导工艺制备, 因此容易实现多像元 (即空间复用) 集成频谱仪芯片。目前, 基于超导

KID 探测器的单片集成光谱探测器仍处于起步阶段, 但在国际上已受到广泛关注, 被认为将成为一种革命性的太赫兹频谱探测技术。近期, DESHIMA 在 ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) 太赫兹天文望远镜上实现了演示应用^[16], 这标志着其在实践中的潜力正在逐步得到验证。

自 2012 年起, 中国科学院紫金山天文台在国内率先开展了超导 KID 探测器技术研究。经过长达十年的不懈努力, 成功设计并制备了大规模阵列的超导 KID 探测器。利用单层氮化钛 (TiN) 和铝 (Al) 超导薄膜, 研制了国内首个 32×32 像元超导 KID 动态电感探测器芯片。同时, 开发了大规模超导 KID 动态电感探测器频分复用读出电路以及快速数据处理软件, 实现了数据读出和管线处理流程等关键技术。在此基础上, 成功在同一芯片上基于超导 Al 膜制备了 0.35/0.85/1.4 THz 三频段的超导 KID 探测器^[17], 每个频段的超导 KID 探测器均采用硅透镜和双槽天线耦合太赫兹信号, 如图 8 所示。实验结果显示, 在 1 pW 以上的太赫兹辐射条件下, 观测到了光子涨落导致的背景噪声, 而在 1 fW 以下的太赫兹辐射条件下, 观测到了探测器中的 Generation-Recombination 噪声。该探测器的灵敏度达到了 $6 \times 10^{-18} \text{ W/Hz}^{0.5}$, 远远超过了地面背景极限探测灵敏度。此外, 南京大学、中国科学院高能物理研究所等国内单位也积极开展超导 KID 探测器技术研究, 为我国未来太赫兹波段探测领域的发展提供了有力支持。

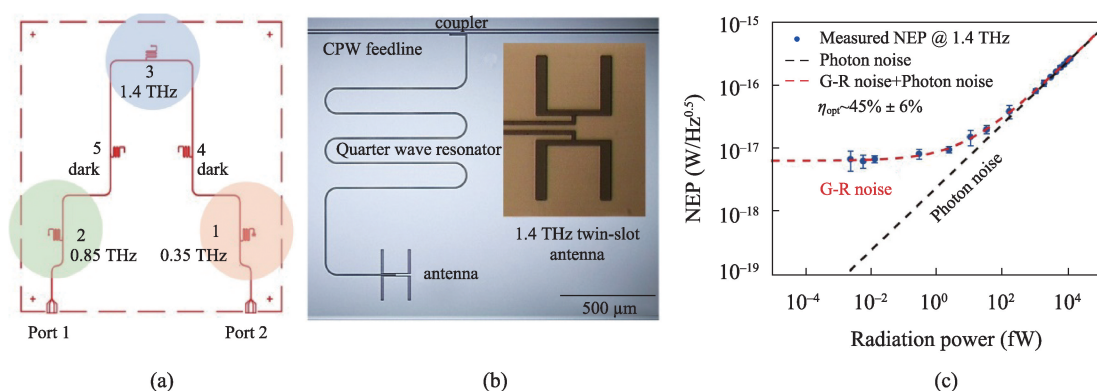


图 8 (a) 0.35/0.85/1.4 THz 三频段超导 KID 探测器布局; (b) 0.85 THz 超导 KID 探测器芯片照片; (c) 理论与实测超导 KID 探测器的噪声等效功率

3. 石墨烯新型探测器技术

石墨烯是一种新型材料,由以 sp^2 杂化连接的碳原子紧密堆积成单层二维蜂窝状晶格结构。2010年,英国曼彻斯特大学物理学家安德烈·盖姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫从石墨中成功分离出石墨烯,因此共同获得了诺贝尔物理学奖。石墨烯的特殊结构赋予其许多独特的物理特性,如高电子迁移率、低电子热容和弱电声相互作用。这些显著特性使得二维石墨烯成为研制太赫兹波段高灵敏度探测器的理想材料之一。2012年,美国加州理工学院的石墨烯研究小组基于石墨烯低温参数和非相干探测器理论模型,预测石墨烯探测器可以达到与超导探测器相媲美的灵敏度。然而,与超导材料不同,石墨烯的电阻与电子温度相关性非常微弱。在研制石墨烯探测器时,如果考虑采用成熟的低噪声电阻读出技术,就需要增强石墨烯电阻与电子温度的相关性。目前,提高石墨烯电阻-温度系数的方法包括引入可调谐带隙、外延生长石墨烯量子点以及采用无序(disorder)石墨烯等。通过这些方法,石墨烯探测器已经实现了超高的电阻-温度系数(约 $430\text{ M}\Omega/\text{K}$)和电响应率(约 10^{10} V/W)。然而,高电阻-温度系数的石墨烯探测器在光学耦合效率方面通常较低。原因在于这类探测器的电阻往往接近或超过兆欧姆,难以与太赫兹天线(其典型特征阻

抗一般为几十或几百欧姆)高效匹配。

近年来,一种新型的石墨烯探测器技术,即基于热噪声读出的太赫兹石墨烯热电子探测器技术被提出。所谓的热噪声读出(Noise thermometry),是通过监测石墨烯探测器输出的热噪声变化($P_T = k_B T_e B$,其中 P_T 代表热噪声, k_B 为玻尔兹曼常数, T_e 为电子温度, B 为探测带宽)来检测太赫兹辐射强度。最近,中国科学院紫金山天文台与中国电子科技集团公司第十三研究所合作,进行了基于热噪声读出的太赫兹石墨烯热电子探测器技术的研究,并成功研制了一种基于高载流子密度双层石墨烯的零偏压太赫兹石墨烯热电子探测器。中国科学院紫金山天文台与中国电子科技集团公司第十三研究所对比了普通金电极和超导铌电极的太赫兹石墨烯热电子探测器在 $0.3\sim 10\text{ K}$ 温度范围内的热导率和噪声等效功率/NEP等指标^[5]。研究发现,当采用超导铌材料制备太赫兹石墨烯热电子探测器的接触电极后,石墨烯微桥中的电子热扩散会因安德烈耶夫反射效应得到有效抑制,从而使得太赫兹石墨烯热电子探测器的灵敏度提高了约两个量级。

此外,荷兰代尔夫特理工大学于2007年成功观测到超导材料与二维石墨烯材料之间的临近效应(proximity effect)引起的约瑟夫森隧穿现象,为研制石墨烯探测器提供了全新的思路,即超导体-石墨烯-超导体(SGS)约瑟夫森结探测器。与传统SNS

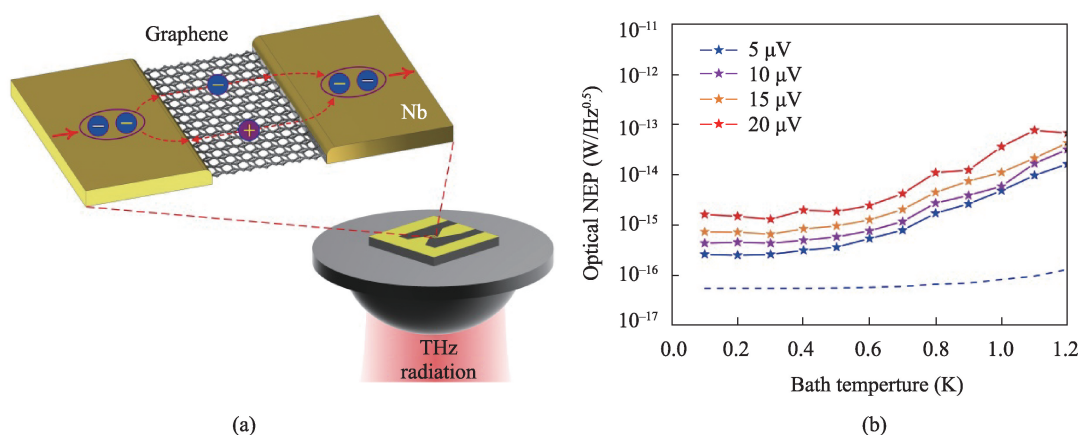


图9 (a)太赫兹超导体-石墨烯-超导体约瑟夫森结探测器示意图;(b)不同偏压下实测探测器灵敏度(光学噪声等效功率)随环境温度变化

约瑟夫森结探测器相比,将二维石墨烯材料与超导材料的巧妙结合,为研制具备更高灵敏度和更快响应速度的SGS约瑟夫森结探测器开辟了新的途径。SGS约瑟夫森结探测器在微波波段率先取得突破,哈佛大学与雷神BBN公司联合研制的微波SGS约瑟夫森结探测器,该探测器采用了内嵌微波谐振器,在谐振频点7.9 GHz处耦合效率高达99%,探测器灵敏度达到 $7 \times 10^{-19} \text{ W/Hz}^{0.5}$,对应于32 GHz的单光子能量分辨率。同时,芬兰Aalto大学等团队报道了迄今为止最高灵敏度的微波SGS约瑟夫森结探测器,实测灵敏度达到 $3 \times 10^{-20} \text{ W/Hz}^{0.5}$,时间常数为500 ns。该研究采用了栅极电压可控的SGS约瑟夫森结与片上电容耦合,形成了一种温度相关的电感电容谐振器,通过辐射石墨烯引起电子温度变化,从而引起电感及谐振器频率的变化,并通过低噪声放大电路完成读出。近期,中国科学院紫金山天文台与中国电子科技集团公司第十三研究所合作,利用高温热解法外延生长的双层石墨烯,制备了SGS约瑟夫森结探测器芯片,成功观测到超导电极与石墨烯之间临近效应导致的约瑟夫森隧穿现象,并采用低噪声超导量子干涉仪作为读出电路,国际率先实现了太赫兹波段高灵敏度SGS约瑟夫森结探测器,1.4 THz频段实测光学噪声等效功率优于 $5 \times 10^{-16} \text{ W/Hz}^{0.5[6]}$,达到地面背景极限灵敏度。

三、总结和展望

总的来说,低温超导探测器在太赫兹波段的微弱电磁信号探测方面表现出色,正在宇宙学、天体物理学和天体化学等领域发挥越来越重要的作用。然而,随着未来太赫兹天文观测需求的增加,超导探测器技术还需要进一步突破。针对太赫兹超导相干探测器技术的研究,关键在于提高灵敏度和射频/中频带宽,以及实现与本振信号源和低温制冷低噪声放大器的集成技术。超导SIS混频器工作频段的拓展需要高质量高能隙(如氮化铌、二硼化镁等)超导隧道结技术的进步,而超导HEB混频器

中频带宽的扩展则依赖于新型超薄超导薄膜材料及其制备技术的进步。此外,基于超导混频器的百像元规模太赫兹波段多波束接收机集成技术的研究也是一个重要方向,包括数字边带分离、中频带宽扩展、本振信号分配、直流偏置复用和模块化集成技术等。在太赫兹超导非相干探测器技术方面,需要持续提高探测器的灵敏度和像素规模,同时还需要不断改进器件设计制备技术和读出电路技术。基于二维石墨烯材料,尤其是石墨烯与超导相结合的新型太赫兹探测器仍处于初步阶段,其制备技术、探测器灵敏度和像素规模有待进一步发展。值得特别指出的是,超导KID探测器不仅在天体物理成像探测方面表现突出,在单片集成三维成像频谱仪技术方面也具有日益重要的价值。此外,在光学红外波段成像探测、超导TES探测器微波读出、量子信息和基础物理等领域,超导KID探测器也具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] J.R. Tucker and M.J. Feldman, Quantum detection at millimeter wavelengths, *Reviews of Modern Physics*, vol. 57, no. 4, pp. 1055-1113, 1985.
- [2] E.M. Gershenzon, G.N. Goltsman, I.G. Gogidze, et al., Millimeter and submillimeter range mixer based on electronic heating of superconducting films in the resistive state, *Soviet Physics Superconductivity*, vol. 3, pp. 1582-1597, 1990.
- [3] K.D. Irwin and C.G. Hilton, *Transition-edge sensors, Cryogenic particle detection*, Berlin: Springer, pp. 63-150, 2005.
- [4] P. Day, H. LeDuc, B. Mazin, et al., A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays, *Nature*, vol. 425, pp. 817 - 821, 2003.
- [5] W. Miao, F.M. Li, Z.Z. He, et al., Demonstration of a high-sensitivity and wide-dynamic-range terahertz graphene hot-electron bolometer with Johnson noise thermometry, *Applied Physics Letter*, vol. 118, p. 013104, 2020.
- [6] W. Miao, F.M. Li, Q.H. Luo, et al., A terahertz detector based on superconductor-graphene-superconductor Josephson junction, *Carbon*, vol. 202, pp. 112-117, 2023.
- [7] J. Li, M. Takeda, Z. Wang, et al., Low-noise 0.5 THz all-NbN superconductor-insulator-superconductor mixer for submillimeter

- wave astronomy, Applied Physics Letter, vol. 92, p. 222504, 2008.
- [8] C.L. Brogan, L.M. Pérez, T.R. Hunter, et al., The 2014 ALMA long baseline campaign: first results from high angular resolution observations toward the HL Tau region, The Astrophysical journal letters, vol. 808, no. 1, pp. L3, 2015.
- [9] K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, et al., First M87 event horizon telescope results. I. the shadow of the supermassive black hole, The Astrophysical Journal Letters, vol. 875, no.1, 2019.
- [10] W. Miao, F.M. Li, H. Gao, et al., Linear and nonlinear flux-flow behaviors in superconducting hot electron bolometer mixers, Applied Physics Letter, vol. 118, p. 112602, 2021.
- [11] K.M. Zhou, W. Miao, Z. Lou, et al., A 1.4 THz quasi-optical NbN superconducting HEB mixer developed for the DATE5 Telescope, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, p. 2300805, 2015.
- [12] R. Gusten, H. Wiesemeyer, D. Neufeld, et al., Astrophysical detection of the helium hydride ion HeH^+ , Nature, vol. 568, no. 7752, pp. 357-359, 2019.
- [13] <https://cmb-s4.org>.
- [14] Q.H. Luo, J.Q. Zhong, W. Miao, et al., A 220 GHz superconducting titanium transition edge sensor array developed for cosmic microwave background experiments, Superconductor Science and Technology, vol. 36, p. 115004, 2023.
- [15] R. Adam, A. Adane, P.A.R. Ade, et al., The NIKA2 large-field-of-view millimeter continuum camera for the 30m IRAM telescope, Astronomy & Astrophysics, vol. 609, no. A115, 2018.
- [16] T. Takekoshi, K. Karatsu, J. Suzeki, et al., DESHIMA on ASTE: on-sky responsivity calibration of the integrated superconducting spectrometer, Journal of Low Temperature Physics, vol. 199, pp. 231-239, 2020.
- [17] Q. Shi, J. Li, Q. Zhi, et al., Terahertz superconducting kinetic inductance detectors demonstrating photon- noise- limited performance and intrinsic generation-recombination noise, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, vol. 65, p. 239511, 2022.



科苑快讯

可拉伸、可回收的柔性新材料

美国普林斯顿大学的工程师团队开发出一种3D打印技术,可生产定制版的兼具伸缩性和柔韧性的软塑料,而且还能回收利用,成本效益显著——这些优势在市售材料中颇为罕见。研究人员认为,该技术在柔性机器人、医疗设备、假肢、轻型头盔、定制版高性能鞋底等领域,具有潜在应用价值。

领导该研究团队的戴维森(Emily Davidson)详细介绍了他们使用热塑性弹性体(thermoplastic elastomer)制作刚度可调3D打印结构的方法。通过设计打印路径,工程师可对材料的物理属性编程,允许设备在一个方向上拉伸和弯曲,同时在另一个方向上保持刚性。戴维森说,弹性体形成了可控的纳米结构,可以创造出在不同方向上具有定制特性的材料。

为了有效诱导刚性纳米结构的排列,研究人员分析了用于控制印刷材料物理属性的印刷速度和受控挤压方式。在对材料加热和冷却的控制过程中,热退



火技术起到了关键作用。退火技术还具有自愈功能,切割后通过重新附着而修复后的材料与原始样品特性相同。

以前用液晶弹性体(liquid crystal elastomer)生产这类材料,价格高达每克2.5美元以上;而他们以热塑性弹性体为原料、以3D打印机为设备的制造成本仅为每克1美分。

(高凌云编译自2024年12月29日SciTechDaily网站)