

超高灵敏度太赫兹超导探测器

史生才 李婧 张文 缪巍

Terahertz high-sensitivity superconducting detectors

Shi Sheng-Cai Li Jing Zhang Wen Miao Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 228501 (2015) DOI:

10.7498/aps.64.228501 在线阅读 View online: [http://dx.doi.org/10.7498/](http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228501)

[aps.64.228501](http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228501) 当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三维传输子量子比特的退相干参数表征

Decoherence characterization of three-dimensional transmon

物理学报.2014, 63(22): 220305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.220305>

基于弱非线性实现非破坏性测量两光子 Bell 态及三光子 Greenberger-Horne-Zeilinger 态

Quantum nondemolition measurement of two-photon Bell-state and three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger-state based on weak nonlinearities

物理学报.2013, 62(10): 100304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.100304>

关于多比特电路量子动力学系统中光子自由度的消除方案研究

On the scheme of cavity photon elimination in multi-qubit circuit-quantum electrodynamics system

物理学报.2012, 61(24): 240305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.240305>

关于电路量子电动力学系统中光子自由度的消除方案

On the schemes of cavity photon elimination in circuit-quantum electrodynamics systems

物理学报.2012, 61(18): 180302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.180302>

Stark 位移对热环境下双 Jaynes-Cummings 模型中原子纠缠的影响

Effect of the Stark shift on entanglement in a double Jaynes-Cummings model in thermal environment

物理学报.2012, 61(16): 160304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.160304>

专题: 太赫兹物理

超高灵敏度太赫兹超导探测器*

史生才† 李婧 张文 缪巍

(中国科学院紫金山天文台, 毫米波和亚毫米波技术实验室, 南京 210008)

(中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210008)

(2015年4月21日收到; 2015年6月2日收到修改稿)

太赫兹 (THz) 波段一般定义为 0.1—10 THz 的频率区间, 对应波长范围 3 mm—30 μm , 覆盖短毫米波至亚毫米波段 (远红外). 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. 因此, 太赫兹波段的天文观测在天体物理及宇宙学研究中具有不可替代的作用, 对于理解宇宙状态和演化具有非常重要的意义. 具有超高灵敏度的太赫兹超导探测器, 已经成为太赫兹波段观测的主要手段. 本文主要阐述了太赫兹超导探测器的基本类型和工作原理, 以及中国科学院紫金山天文台在该领域的主要研究成果和进展.

关键词: 太赫兹, 超导, 灵敏度, 探测器**PACS:** 85.25.Pb, 85.25.Am, 95.55.Jz**DOI:** 10.7498/aps.64.228501

1 引言

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. 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, 还可具有更宽的瞬时带宽.

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) 太赫兹波段有非常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^[1,2].

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,

* 国家重大科研仪器研制项目 (批准号: 11127903)、国家自然科学基金重大项目 (批准号: 11190012)、中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDB04010300) 和国家自然科学基金优秀青年科学基金 (批准号: 11422326, 11222329) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: scshi@pmo.ac.cn

进而更清晰地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。

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. 20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地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着越来越重要的作用. 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.

与其他波段类似, 太赫兹探测器分成相干探测器和非相干探测器两大类. 太赫兹相干探测器能够同时探测信号的幅度和相位信息, 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(HEB)混频器两种, 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).

衡量太赫兹超导探测器灵敏度的参数有许多, 但在射电天文的应用领域, 探测器灵敏度的两个最主要参数为: 1) 噪声温度 T , 单位K, 噪声温度是将有噪声的系统定义为固有噪声加上一个等效的输入噪声, 在接收机系统中, 系统噪声温度包含了馈源和波导损耗引入的噪声和接收机噪声, 噪声

温度可用量子极限衡量, 通常对于射电天文应用的超导接收机, 可实现的噪声温度在3至5倍量子极限之间; 2) 噪声等效功率(NEP), 单位 $\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, 指信噪比为1时入射到探测器上的辐射功率, 对超导探测器而言, 该参数越小越好, 目前紫金山天文台研发的超导探测器在实验室的测试NEP可达 10^{-14} — $10^{-16} \text{ W}/\text{Hz}^{0.5}$ 量级.

2 太赫兹相干探测器

2.1 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(厚约几十Å)构成, 如图1(a)所示. 超导隧道结混频器的典型伏安(I - V)特性曲线示于图1(b). 需要指出的是, 这里显示的SIS结的 I - V 特性是基于准粒子隧穿效应, 而非库珀对隧穿效应. 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[3]. 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[4], 但在0.7—1.4 THz的区间尚未突破5倍量子极限[5,6].

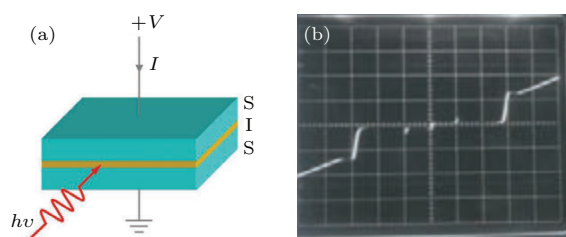


图1 (a) SIS结的结构示意图; (b) 典型SIS结的伏安特性曲线 (X : 1 mV/div; Y : 0.1 mA/div)

Fig. 1. (a) Schematic of SIS junction; (b) I - V curve of the SIS junction (X : 1 mV/div; Y : 0.1 mA/div).

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.

如前所述, 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珀对 (Cooper pair), 进而导致能量损耗. 另一方面, SIS 混频器的上限频率约为其能隙频率的两倍. 为了发展高于 Nb 能隙频率的高灵敏度 SIS 混频器, 人们一直在尝试研究高能隙 SIS 混频技术. 基于这一发展趋势, 中国科学院紫金山天文台成功研制了 0.5 THz 频段基于高能隙超导材料氮化铌 (NbN) 的隧道结混频器, 研究了其物理特性, 并实验揭示了其在 Josephson 噪声干扰抑制和工作温度区间拓宽等方面有明显优势. 将其应用于 POST 亚毫米波望远镜接收机系统, 在 462 和 493 GHz 两个具有天文观测意义的频率点成功测试了波导型 NbN SIS 混频器的噪声特性, 未校准双边带接收机噪声温度低达 5 倍量子极限, 这是该频段 NbN SIS 混频器实现的最好性能, 基本达到了 Nb SIS 混频器的性能水平. 该超导隧道结混频器成功应用于天文观测, 获得第一条基于氮化铌超导隧道结混频器的天文观测谱线. 相关研究成果示于图 2 和图 3.

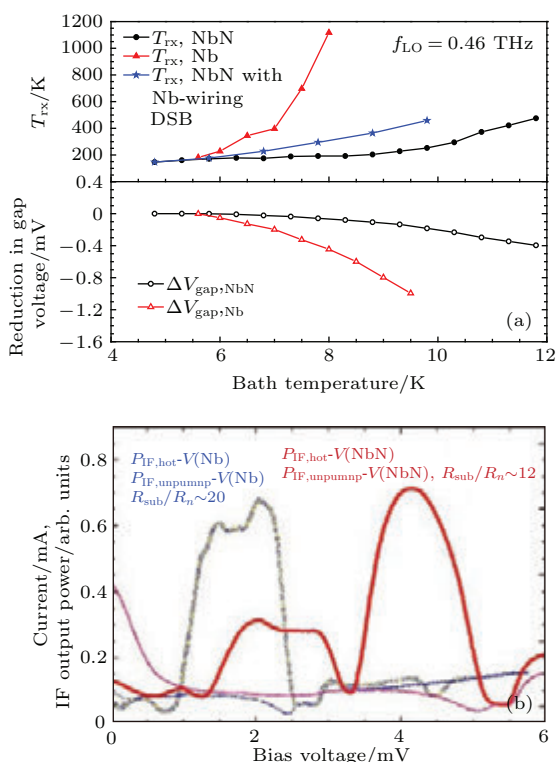


图 2 (a) 实测 0.5 THz 频段 NbN 和 Nb SIS 混频器接收机噪声温度的温变特性 (上小图) 和两种隧道结能隙电压相应的变化曲线 (下小图); (b) 实测 0.5 THz 频段 NbN 和 Nb SIS 混频器中频输出功率电压响应曲线的对比 [7]

Fig. 2. (a) Comparison of the measured 0.5 THz NbN and Nb SIS mixers' T_{rx} (up) and ΔV_{gap} (down); (b) comparison of the IF output power of the 0.5 THz NbN and Nb SIS mixers [7].

目前, 太赫兹 SIS 混频器的发展趋势主要是灵敏度、工作频率、射频带宽、瞬时带宽等性能指标的进一步提高. 针对这一趋势, 寻求更高能隙的超导材料、攻克高能隙超导隧道结混频器制备工艺等成为必然. 随着高能隙超导隧道结制备技术的提高和新材料的应用, 预期高能隙 SIS 混频技术研究将会得到新的发展.

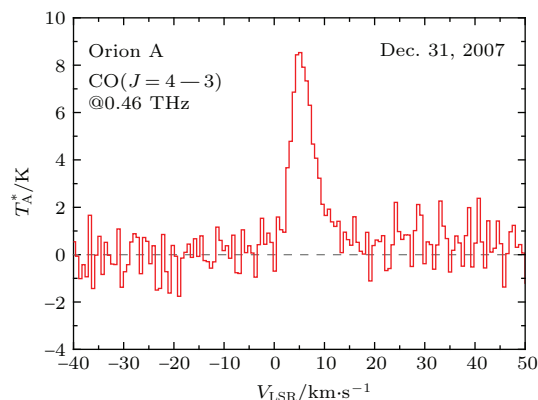


图 3 国际首条利用 NbN SIS 混频器成功观测到的天文谱线 [7]

Fig. 3. The first astronomical line observed with NbN SIS mixer [7].

2.2 超导 HEB 混频器

超导 HEB 混频器由超导微桥和射频耦合电路构成 (如图 4 所示). 超导微桥为一层几纳米厚的超导薄膜, 两端通过电极与射频耦合电路连接实现射频信号耦合和直流偏置. 超导微桥中的某个电子吸收太赫兹光子后通过电子之间的相互作用使得电子温度升高 (即热电子效应), 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 [8], 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 [9], 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. 图 4 列举了国际上主要研究小组公开发表的超导 HEB 混频器的接收机噪声温度 [10]. 随着对热电子混频机理的深入理解、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, 个别频率点已经突破 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.

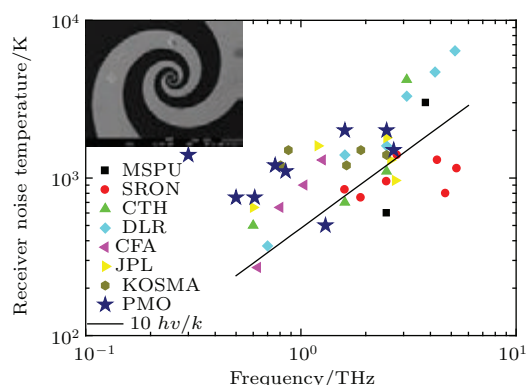


图 4 国际上主要研究小组公开发表的超导 HEB 混频器的接收机噪声温度. 内插图平面螺旋天线耦合的超导 HEB 热电子混频器芯片中心部分的 SEM 照片^[10]

Fig. 4. The mainly results of the noise temperatures of the HEB mixers measured in different groups. Insert: the SEM picture of the spiral antenna on the center part of HEB mixer chip^[10].

国内相关研究小组也在超导 HEB 混频器工作方面取得了显著进展, 如南京大学等^[11]. 中国科学院紫金山天文台在超导 HEB 混频器研究方面, 探索了 4 K 闭环制冷机固有的机械振动和温度波动对

其性能的影响, 取得了与液氮制冷相当的性能^[12]. 随后研究了超导 HEB 混频器的混频机理、噪声来源等特性. 在此基础上, 成功为南极 5 m 太赫兹望远镜研制了 1.4 THz 频段的超导 HEB 混频器.

2.2.1 超导微桥对不同太赫兹频率光子的非均匀吸收^[13]

超导 HEB 混频器的理论框架是热点模型 (hot spot model): 在直流和太赫兹信号的共同作用下, 超导微桥中心部分的电子温度超过临界温度形成热点, 而两端由于电子扩散的存在其温度接近电极温度依然处于超导态. 假设太赫兹光子能量远大于超导材料的能隙, 足以拆开超导微桥中的库珀对形成准粒子, 因此认为超导微桥各部分对太赫兹信号均匀吸收, 而直流信号只在热点内才会被吸收. 这一理论较好地解释了超导 HEB 混频器工作在高于能隙频率下的性能, 但是实验表明超导 HEB 混频器在低于能隙频率的频段依然具有较高的灵敏度. 我们引入 Mattis-Bardeen 理论, 计算出超导微桥各部分在不同温度下的表面阻抗, 从而解释了超导 HEB 混频器对不同频率太赫兹辐射的非均匀吸收. 图 5 是在 100 和 600 GHz 不同信号功率辐照下理论计算的超导 HEB 混频器的电阻温度曲线.

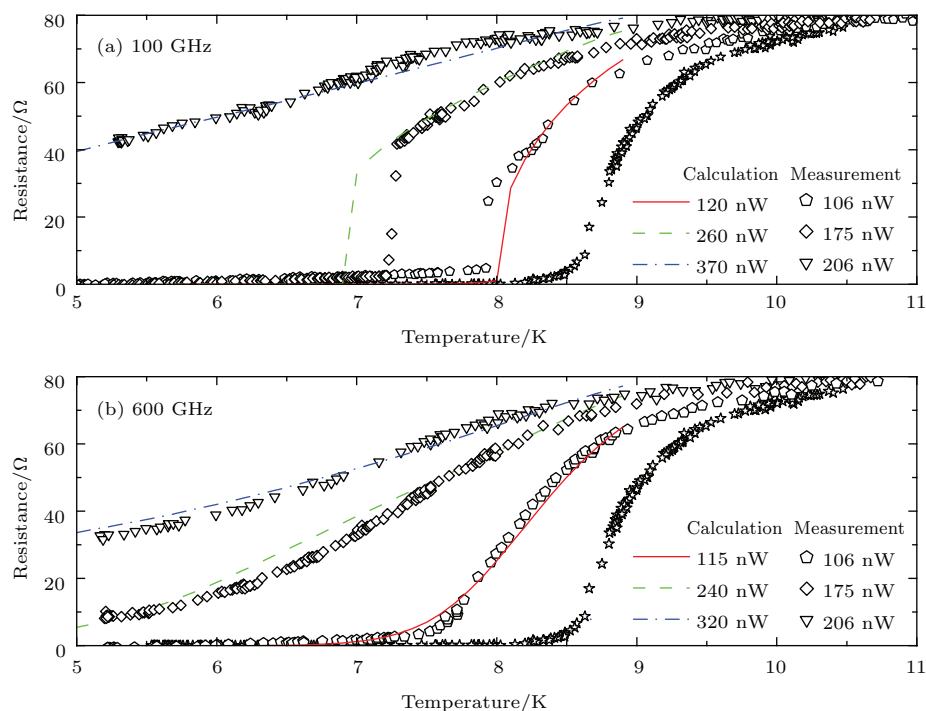


图 5 测量 (符号) 和理论 (线) 计算的超导 HEB 热电子混频器在不同本振功率辐照下的电阻转变曲线^[13]

Fig. 5. Measured (symbols) and calculated (lines) R - T covers of the HEB mixers loaded by different LO power^[13].

当信号频率 (100 GHz) 低于能隙频率时, 随着信号功率的增加, 超导微桥的临界温度逐渐降低, 表明低于超导微桥的临界温度, 由于热激发准粒子较少, 而库珀对无法吸收太赫兹辐射, 超导微桥处于超导态; 随着工作温度升高, 热激发准粒子数也相应增加, 个别电子吸收太赫兹辐射后温度升高, 通过电子-电子相互作用, 使得其他的电子温度也升高, 进一步降低超导微桥的能隙, 使其更容易吸收太赫兹辐射, 加速温度的升高, 导致电阻的增加. 当信号频率 (600 GHz) 接近超导微桥的能隙频率, 光子可以拆开库珀对形成准粒子, 使超导微桥中的电子温度升高, 宏观表现为电阻随着温度连续变化. 在图 5 中同时也给出了实测的超导 HEB 混频器在 100 和 600 GHz 不同信号功率下的电阻温度曲线, 与理论计算完全符合.

2.2.2 超导 HEB 混频器中的量子噪声 [14]

超导 HEB 混频器是 1 THz 以上灵敏度最高的相干探测器, 在个别频率点上已经突破 5 倍量子噪声极限. 探索超导 HEB 混频器的噪声极限需要了解各种噪声源的贡献. 随着频率的增加, 量子噪声的贡献会越来越大. 根据超导 HEB 混频器的量子噪声理论, 需要针对同一超导 HEB 混频器测量其在一系列频率点上的接收机噪声温度, 从而分析其量子噪声的贡献. 为此, 我们设计并制备了宽频带的平面螺旋天线耦合的超导 HEB 混频器, 通过引入超导电极降低太赫兹信号在传输过程中的损耗, 在 1—5 THz 频率范围内具有无可比拟的探测灵敏度. 采用了真空测量系统, 冷/热负载和波束分离器位于同一真空容器内, 大大降低了准光学损耗及其不确定性. 另外, 在冷/热负载辐照下, 通过测量超导 HEB 混频器中频输出功率随偏置电流 (本振功率) 的变化获得接收机噪声温度, 排除了其固有直接检波效应的影响, 使接收机噪声温度的不确定性小于 5%, 从而为量子噪声贡献的分析提供了可能.

针对同一超导 HEB 混频器, 利用同一套测试系统实验表征了从 1.6—5.3 THz 的接收机噪声温度. 结果如图 6 所示, 随着频率升高, 接收机噪声温度缓慢增加. 不同频率下的最佳电流-电压曲线完全符合 (如图 6 内插图所示), 表明超导微桥在不同频率下的行为一致, 经典噪声贡献和量子噪声增强因子与频率无关. 根据量子噪声理论, β 值为 3, 表明量子噪声因为超导微桥的非平衡分布效应而

增强了 3 倍, 在 5.3 THz 量子噪声的贡献已经超过 50%.

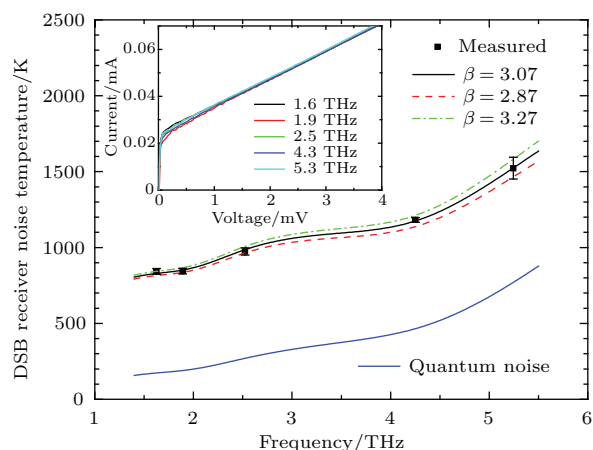


图 6 测量的超导 HEB 混频器在不同本振频率下的接收机噪声温度及量子噪声贡献. 内插图为在不同本振频率下超导 HEB 混频器的最佳电流-电压曲线 [14]

Fig. 6. Measurement receiver noise temperature and quantum noise contribution of the superconducting HEB mixer under the different LO frequencies [14].

2.2.3 南极 5 m 太赫兹望远镜 1.4 THz 频段接收机 [15]

南极海拔最高的冰穹 A 是地面上最佳的太赫兹天文观测站址. 我国拟建的“十二五”国家重大科技基础设施建设项目“中国南极昆仑站天文台”, 其中一台是 5 m 太赫兹望远镜, 将工作在 350 和 250 μm 谱段, 分别采用 SIS 混频器和超导 HEB 混频器. 为此, 我们研制了 1.4 THz 频段的平面双槽天线耦合的超导 HEB 混频器 (如图 7 所示). 在器件制备过程中通过电子束曝光一次性形成接触电极和平面天线, 有效降低了射频传输损耗, 在 1.29 THz 实测接收机噪声温度为 600 K. 然后进一步采用 Parylene C 防反射层降低硅透镜表面的反射, 接收机噪声温度降低为 450 K, 远远超过南极 5 m 太赫兹望远镜的灵敏度指标. 200 μm 波段超导 HEB 混频器的成功研制突破了 DATE5 望远镜的一项关键技术.

超导 HEB 混频器技术在过去 20 年里取得了巨大的发展, 并且成功应用到地面和空间望远镜上. 尽管如此, 随着应用范围的拓展以及技术的不断进步, 超导 HEB 混频器技术依然存在巨大的发展空间. 超导 HEB 混频器的灵敏度已经突破 5 倍量子噪声极限, 在太赫兹高频段量子噪声贡献起主导作用, 有可能实现接近量子噪声极限的超导 HEB 混频器. 超导 HEB 混频器本身没有频率限

制, 意味着在太赫兹高频段可以实现高灵敏度检测, 这方面莫斯科师范大学做了尝试性研究. 同时一些大型望远镜如SOFIA在多频段单像元外差混频器(GREAT)的基础上, 正在开发阵列接收机(upGREAT), 计划研制 2×7 像元2.5 THz频段接收机阵列和 1×7 像元4.7 THz频段接收机阵列. 另外一些极端环境下的应用(如南极、深空探测、星际飞行), 由于受到能源供应的限制, 要求超导HEB混频器在较高工作温度下依然具有很高的灵敏度, 因此近年来人们开始研究基于新超导材料(如MgB₂, FeSeTe等)的超导HEB混频器特性.

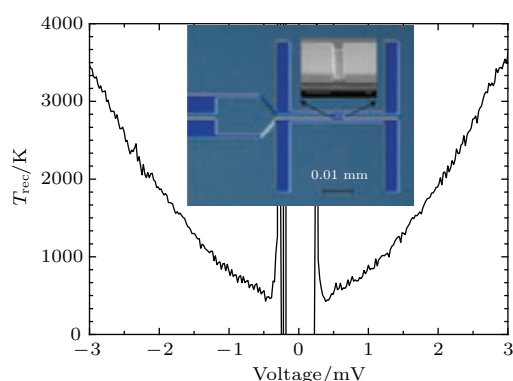


图7 超导HEB混频器在1.3 THz本振频率的接收机噪声温度. 内插图为双槽天线耦合的超导HEB混频器SEM照片及超导微桥部分的放大图片^[15]

Fig. 7. The noise temperature of the HEB mixer at the LO frequency of 1.3 THz. Insert: the SEM picture of the twin-slot antenna of the HEB mixer^[15].

2.3 超导HEB与量子级联激光器(QCL)集成探测器

除了高灵敏度混频器, 太赫兹超导HEB混频器中还需要有高频率和功率稳定度的太赫兹本振抽运源. 近年来, 一种基于电子在半导体材料量子阱中导带子带间跃迁的新型单极半导体源——太赫兹量子级联激光器^[16]取得了飞速发展, 其在辐射功率、频率以及工作温度等方面均有显著突破, 已成为太赫兹超导HEB混频器中最理想的本振抽运源.

2.3.1 基于太赫兹量子级联激光器的超导相干频谱仪

目前, 太赫兹量子级联激光器在本振抽运源应用方面已取得了一系列进展, 包括: 太赫兹量子级联激光器抽运超导HEB混频器噪声特性研究^[17,18], 太赫兹量子级联激光器相位与频率锁定研究^[19,20], 太赫兹量子级联激光器本振频宽特性研究^[21], 太赫兹量子级联激光器输出功率稳定性研究等^[18]. 然而, 以太赫兹量子级联激光器为本振抽运源的高频谱分辨率分子谱线相干探测却并未实现. 为此, 我们利用三阶反馈式量子级联激光器^[22]作为本振抽运源, 超导HEB混频器作为相干探测器, 构建了首个基于太赫兹量子级联激光器的超导相干频谱仪(如图8所示), 并成功实现了甲醇气体分

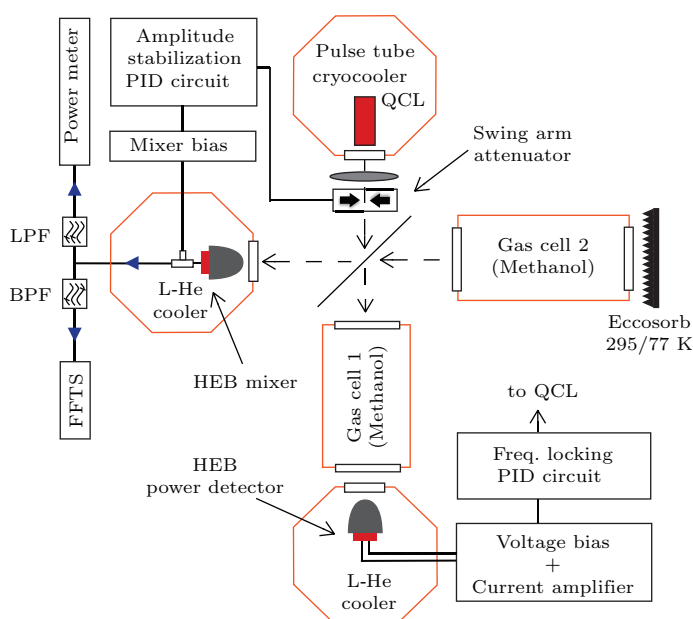


图8 基于太赫兹量子级联激光器的超导相干频谱仪结构图^[24]

Fig. 8. Diagram of the superconducting coherent spectrum instrument based on QCL^[24].

子谱线高频谱分辨率波谱特性相干探测^[23,24]. 其中, 我们利用快速功率可调衰减器与PID (比例-积分-微分) 反馈控制器稳定太赫兹量子级联激光器功率^[24], 同时利用甲醇气体吸收谱线作为锁频参考信号稳定太赫兹量子级联激光器频率^[25], 进而实现了频率与功率同时锁定的太赫兹量子级联激光器本振抽运源. 图9是甲醇气体分子谱线高频谱分辨率相干探测结果.

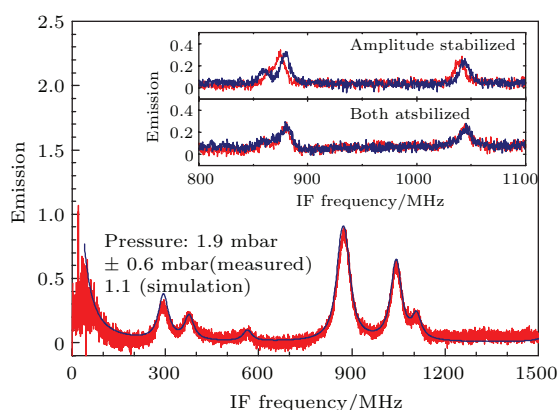


图9 3.452 THz 三阶反馈式量子级联激光器作为本振抽运源, 在频率与功率同时稳定时高频谱分辨率甲醇气体分子谱线测量结果. 内插图是仅有功率稳定以及频率与功率同时稳定时低气压 ($0.12 \text{ mbar} \pm 0.05 \text{ mbar}$) 甲醇气体分子谱线测量结果, 红色与蓝色分子谱线测量时间间隔为 1 h^[24]

Fig. 9. High spectral resolution methanol gas molecular spectral measurement results when the LO frequency and power are stable at the same time. One inset shows a methanol spectrum when the LO is only amplitude stabilized (the upper one), measured twice with 1 h interval time. The second inset shows a methanol spectrum when both amplitude and frequency are stabilized. The gas pressure is reduced to $0.12 \text{ mbar} \pm 0.05 \text{ mbar}$. 3.452 THz third-order feedback QCL is used as the LO source^[24].

2.3.2 基于太赫兹量子级联激光器的超导 HEB 混频器

众所周知, 大多数太赫兹量子级联激光器工作时热功耗相对较大, 可达几瓦甚至几十瓦. 在以太赫兹量子级联激光器为本振抽运源的超导 HEB 混频器中, 通常需要单独使用 4 K 杜瓦冷却太赫兹量子级联激光器, 使得太赫兹超导 HEB 混频器结构复杂, 难以实际应用. 为此, 研究基于太赫兹量子级联激光器的超导 HEB 混频器显得尤为重要. 2008 年, Richter 等^[26] 将超导 HEB 混频器和太赫兹量子级联激光器分别集成于杜瓦 4 K 和 40 K 冷级, 成功实现首个基于太赫兹量子级联激光器的超

导 HEB 混频器, 但其要求杜瓦外有可调光学元件耦合激光器输出信号, 结构仍相对复杂. 为了简化结构, 我们首次提出将超导 HEB 混频器、太赫兹量子级联激光器以及所有光学元件全部集成于单一杜瓦 4 K 冷级 (见图 10), 并成功实现结构更加紧凑的超导 HEB 混频器^[27]. 在该超导 HEB 混频器中, 所有光学元件均低温集成, 空气以及声波对探测器的干扰可完全避免. 考虑到太赫兹量子级联激光器热功耗会影响超导 HEB 混频器工作, 我们采用了 2.7 THz 基于“束缚态至连续态跃迁”设计以及递变型光子异质结谐振腔低功耗量子级联激光器^[28].

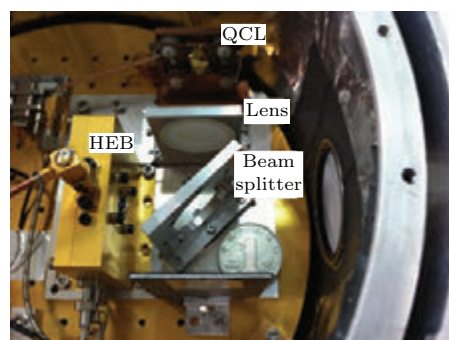


图10 基于太赫兹量子级联激光器的超导 HEB 相干集成探测器^[27]

Fig. 10. Superconducting HEB integrated detector based on QCL^[27].

考虑到太赫兹量子级联激光器与超导 HEB 混频器之间信号低温下难以调节, 我们准确模拟了 2.7 THz 量子级联激光器远场辐射波束, 并实现了 2.7 THz 量子级联激光器辐射波束整形. 图 11 (a) 是 2.7 THz 量子级联激光器结构示意图, 图 11 (b) 和图 11 (c) 是整形前与整形后 2.7 THz 量子级联激光器远场辐射方向图, 整形后激光器远场辐射发散角减小为 $2^\circ \times 3^\circ$, 同时整形后 2.7 THz 量子级联激光器与超导 HEB 混频器之间信号耦合系数提高了 10 倍. 图 11 (d) 是整形后 2.7 THz 量子级联激光器远场辐射方向图测试结果, 与理论结果相符. 另外, 实验测得超导 HEB 混频器接收机噪声温度约为 1500 K, 扣除准光学损耗后噪声温度仅为 600 K.

尽管太赫兹量子级联激光器在本振抽运源应用方面已取得很多突破, 但仍有很多方面有待进一步发展. 目前, Wanke 等^[29] 利用高掺杂度砷化镓将太赫兹量子级联激光器与肖特基混频器叠加, 同时作为激光器正极与肖特基混频器负极, 实现了以太赫兹量子级联激光器为本振抽运源的一体化全固态肖特基集成相干探测器, 但肖特基相干探测器

噪声性能相对较差, 因此太赫兹量子级联激光器与超导 HEB 混频器一体化全固态集成技术将是未来的研究重点. 另外, 现用太赫兹量子级联激光器稳频技术均需要额外一个太赫兹混频器^[19,20,25], 未

来可考虑基于单一超导 HEB 混频器同时实现太赫兹量子级联激光器稳频与太赫兹信号相干检测, 目前该技术已在低频本振抽运源-耿氏振荡器与倍频器组合中应用^[30].

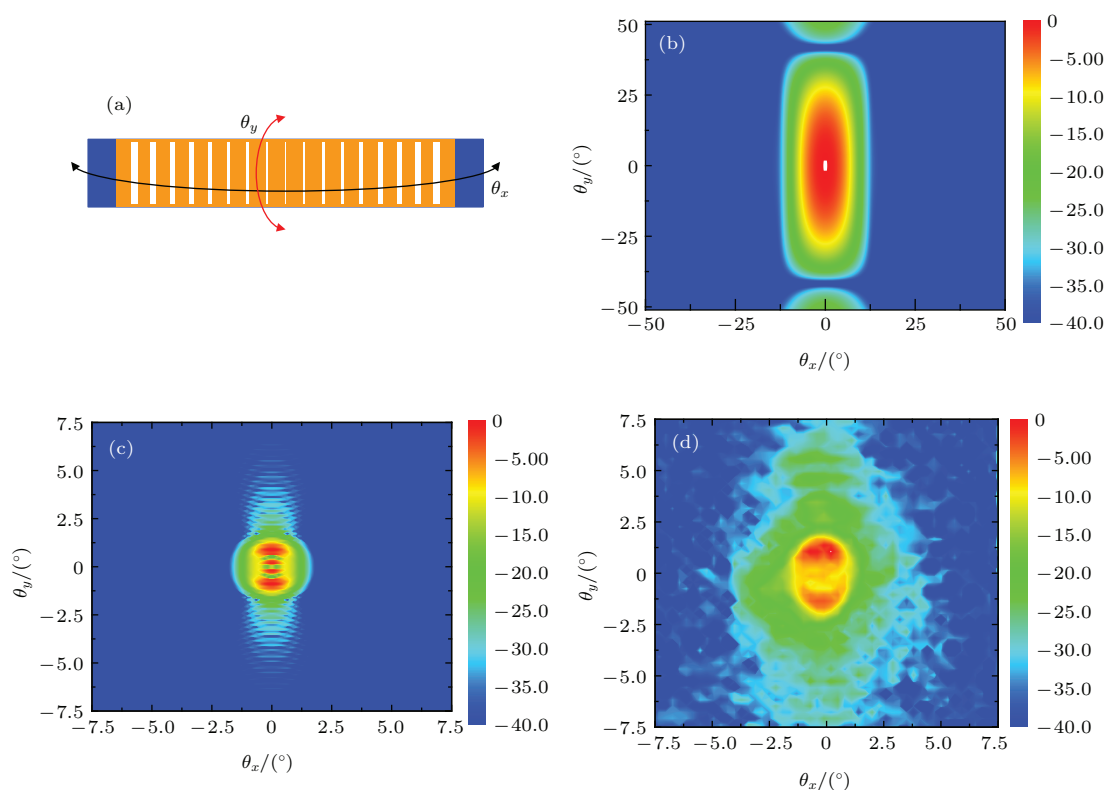


图 11 (a) 2.7 THz 量子级联激光器结构示意图; (b) 模拟仿真整形前 2.7 THz 量子级联激光器远场辐射方向图; (c) 模拟仿真整形后 2.7 THz 量子级联激光器远场辐射方向图; (d) 实验测得整形后 2.7 THz 量子级联激光器远场辐射方向图^[27]

Fig. 11. (a) Structure diagram of the 2.7 THz QCL; (b) the far-field radiation pattern of 2.7 THz QCL before the simulation of plastic; (c) the far-field radiation pattern of 2.7 THz QCL after the simulation of plastic; (d) the measured far-field radiation pattern of 2.7 THz QCL after the simulation of plastic^[27].

3 太赫兹非相干探测器

在基于低温超导器件的太赫兹非相干探测器之前, 天文应用宽带连续谱探测器主要是半导体 Bolometer. 由于非平面电路工艺制备, 像元数一般少于 100. 在工作温度低至 0.1 K 时, 最佳灵敏度 NEP 可接近 $1 \times 10^{-16} \text{ W/Hz}^{0.5}$. 这种探测器阵列的典型代表是应用于 JCMT 亚毫米波望远镜的 SCUBA 相机, 发现了 SCUBA 亚毫米波星系. 进入 21 世纪初, 仍然有许多望远镜采用 Bolometer 探测器阵列, 主要是进一步提升探测器像元数, 但都远少于 1000. 2009 年发射的 Herschel 空间望远镜上的宽带连续谱成像探测器阵 SPIRE 也采用半导体 Bolometer, 最短波长 250 μm 阵列的像元数是 139.

如前所述, 超导探测器由于平面工艺制备易于研制出大规模阵列, 在相同工作温度区间则有更高灵敏度. 从 20 世纪 90 年代末开始, 基于低温超导器件的太赫兹非相干探测器技术得到快速发展, 主要有超导动态电感探测器 (MKIDs) 和超导相变边缘探测器 (TES) 两种.

3.1 超导动态电感探测器 (MKIDs)

太赫兹超导 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, 如图 12 所示. 通过测量这些变化, 可实现对太赫兹信号的探测.

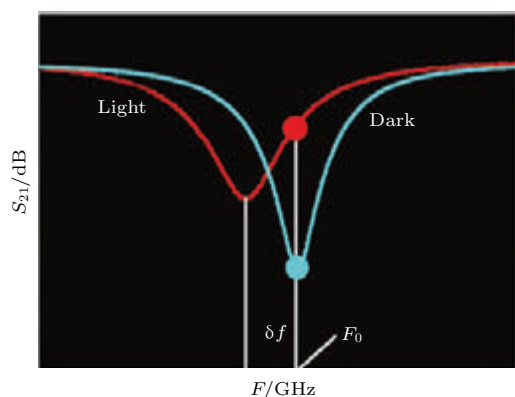


图 12 超导 MKIDs 工作原理图

Fig. 12. Schematic diagram of the MKIDs.

目前国内在超导 MKIDs 研究方面尚处于起步和发展阶段, 中国科学院紫金山天文台通过与荷兰 TUDelft 大学及日本理化学研究所的合作, 已经成功制备基于氮化钛 (NbTiN)、铌 (Nb) 和氮化钛 (TiN) 等多种不同超导薄膜的动态电感探测器阵列, 像元数分别达 64 和 1024 个. 详尽的研究成果如图 13 所示.

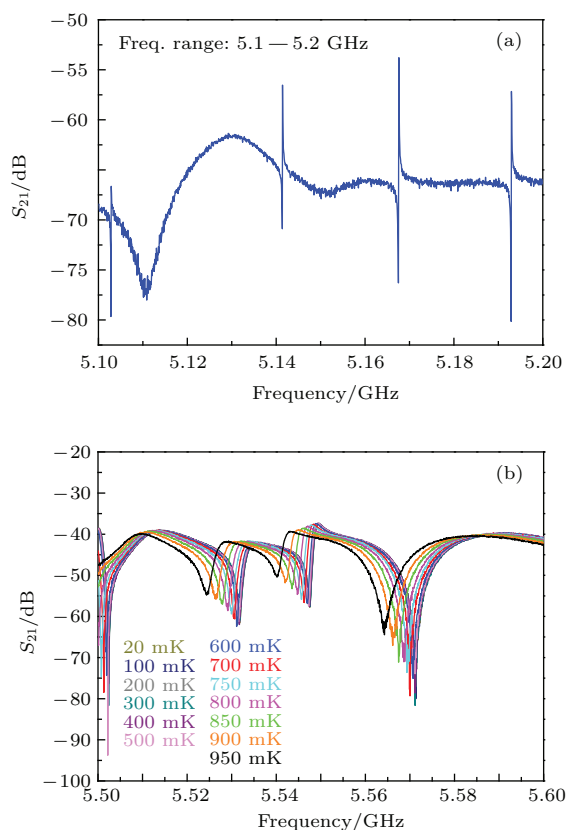


图 13 (a) 超导 MKIDs 的谐振特性; (b) 超导 MKIDs 的谐振特性随温度变化曲线

Fig. 13. (a) The resonance of the MKIDs; (b) the temperature dependence of the MKIDs.

近年来, 太赫兹超导 MKIDs 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, 即微波波段的超宽带低温制冷低噪声放大器和基于高速模数转换器与现场可编程门阵列技术的超宽带高分辨率数字频谱仪 (FFTS). 需要指出的是, 超宽带低温制冷低噪声放大器原来被广泛应用于太赫兹相干探测的前置中放, 而超宽带高分辨率数字频谱仪 (FFTS) 被广泛应用于太赫兹相干探测的后端频谱处理. 太赫兹超导动态电感探测器在 0.3 K 温度的探测灵敏度已达 $1 \times 10^{-18} \text{ W/Hz}^{0.5}$, 技术上也易实现 1000 以上像元大规模阵列.

3.2 超导相变边缘探测器 (TES)

超导 TES 探测器包含一层超导薄膜, 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巨大变化, 并通过极低噪声贡献的超导量子干涉仪构成的电流放大器读出, 从而实现背景极限的探测 [31].

目前国内在超导 TES 探测器研究方面还处于起步阶段, 主要有中国科学院紫金山天文台 [32]、清华大学、中国科学技术大学 [33] 等单位开展相关研究. 紫金山天文台正在为南极 5 m 太赫兹望远镜研制下一代大规模超导探测器阵列成像系统. 基于地面背景极限灵敏度的要求和南极冰穹 A 的极端环境约束, 研制临界温度为 400—500 mK 的 NbSi 和 Ti 超导 TES 探测器.

3.2.1 NbSi 超导 TES 探测器 [32]

NbSi 超导薄膜通过在硅基板上同时蒸发 Nb 和 Si 制备, 其临界温度在 100—800 mK 范围内通过改变 Nb 和 Si 的比例来调节. 如图 14 所示, 在器件

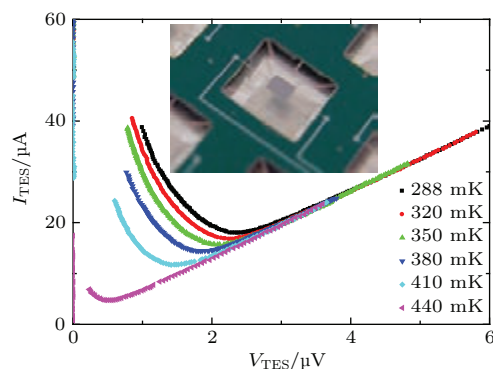


图 14 NbSi 超导 TES 探测器及其电流-电压特性 [32]

Fig. 14. The NbSi TES detector and its I - V curve [32].

制备过程中通过蚀刻工艺去除其背面的硅衬底, 从而使得NbSi 超导 TES 探测器能够有效绝热, 形成很好的电热反馈. 图 14 为实测的 NbSi 超导 TES 探测器在不同工作温度下的电流-电压特性. 根据热平衡方程计算出临界温度为 470 mK, NbSi 与介质基板之间的热导为 345 pW/K. 结合实测的电流噪声谱密度, 获得的噪声等效功率为 5.4×10^{-17} W/Hz^{0.5}, 达到地面天文观测应用的背景极限灵敏度要求 (10^{-16} W/Hz^{0.5}).

3.2.2 Ti 超导 TES 探测器

Ti 超导薄膜的临界温度约为 400 mK, 同时超导微桥可以直接制备在硅介质基板上, 利用电子-声子在低温下的弱相互作用作为导热机理, 具有结构简单的优点. 在高阻硅基板上通过电子束蒸发沉积约 40 nm 厚的 Ti 膜, 随后通过光刻形成微桥. 最后两端的电极由 lift-off 等工艺完成. 如图 15 所示, 超导微桥的尺寸为 $1.2 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$, 较大的接触电极主要目的是减小接触电阻. 利用实验室的稀释制冷机实测了 Ti 超导 TES 探测器在不同工作温度下的特性, 热导为 170 pW/K, 噪声等效功率为 3×10^{-17} W/Hz^{0.5}. 根据估计的热容计算出的响应时间约为 3 μs , 在要求高计数率的单光子探测领域具有潜在的应用价值.

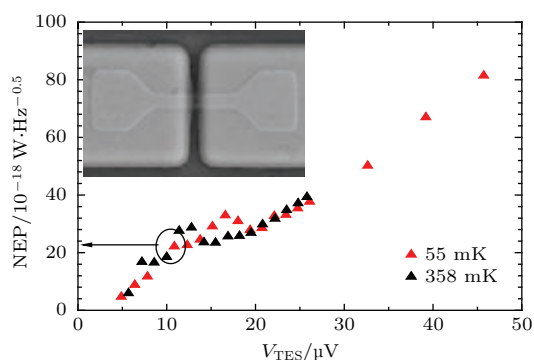


图 15 Ti 超导 TES 探测器及其噪声等效功率

Fig. 15. The Ti TES detector and its NEP test results.

超导 TES 探测器的探测灵敏度只受背景噪声限制. 地面应用要求噪声等效功率低于 10^{-16} W/Hz^{0.5}, 而空间应用因为背景噪声的降低, 如果望远镜天线通过制冷达到 4 K, 则要求噪声等效功率低于 10^{-19} W/Hz^{0.5}. 同时为了进一步提高观测效率, 正在开发更大规模的超导 TES 探测器阵列. 另外, 人们正在研制多频段、双极化的超导 TES 探测器, 以满足宇宙微波背景辐射研究的高精

度观测要求^[34]. 紫金山天文台将会针对南极 5 m 太赫兹望远镜研制达到地面背景极限灵敏度的超导 TES 探测器, 并开发大规模超导 TES 探测器阵列所需的多路读出复用技术.

4 结 论

基于低温超导器件的太赫兹探测技术得到了飞速发展, 但在以下三个方面仍有待突破: 探测灵敏度、大规模阵列、探测频率上限. 在太赫兹超导相干探测技术方面, 探测灵敏度距离量子极限仍有较大改善空间, 特别是在太赫兹高频段. 另外, 探测器阵列像元数仍未突破 100. 除了相干探测系统本身复杂性导致的困难, 高稳定度太赫兹信号源的有限频率范围和较低功率水平都是重要制约因素. SIS 混频器频率上限的提高有赖于高能隙 (即高临界温度) 超导隧道结技术的发展. 这种技术在材料和制备工艺两方面都面临重要挑战. 超导 HEB 混频器在瞬时带宽及稳定性方面仍需突破. 在太赫兹超导非相干探测技术方面, 尽管探测器灵敏度在物理上无限制, 但实际探测器的灵敏度仍未在太赫兹全波段实现背景噪声极限. 且探测器阵列像元数仍在 1000 左右. 要发展更大规模阵列探测器阵, 适合低温环境工作的低功耗、低噪声读出复用技术将是重要挑战.

总体上, 下一代太赫兹望远镜探测终端的发展趋势包括: 1) 连续谱宽带成像探测阵列, 灵敏度达到背景极限, 像素达到 100×100 量级甚至更大, 主要用于探测发现遥远宇宙的亚毫米波/太赫兹图像; 2) 宽波段二维成像谱仪, 带宽覆盖达到 100 GHz, 同时具备大视场覆盖能力, 主要用于精确测量天体在宇宙中的位置 (宇宙学红移及距离); 3) 多波束接收机, 灵敏度达到或接近量子极限, 像素达到 100×100 量级甚至更大, 每路信号通道带宽大于 10 GHz, 主要用于高频谱分辨率谱线成像探测.

参考文献

- [1] Phillips T G, Keene J 1992 *Proc. IEEE* **80** 1662
- [2] Zmuidzinas J, Richards P L 2004 *Proc. IEEE* **92** 1598
- [3] Tucker J R, Feldman M J 1985 *Rev. Mod. Phys.* **57** 1055
- [4] Shan W L, Shi S C, Sekimoto Y, Noguchi T 2007 *IEEE Microw. Wirel. Co.* **17** 268

- [5] Jackson B D, de Lange G, Zijlstra T, Kroug M, Kooi J W, Stern J A, Klapwijk T M 2006 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **54** 547
- [6] Karpov A, Miller D, Rice F, Stern J A, Bumble B, LeDuc H G, Zmuidzinas J 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 343
- [7] Li J, Takeda M, Wang Z, Shi S C, Yang J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 222504
- [8] Gol'tsman G N, Semenov A D, Gousev Y P, Zorin M A, Godidze I G, Gershenzon E M, Lang P T, Knott W J, Renk K F 1991 *Supercond. Sci. Technol.* **4** 453
- [9] Prober D E 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 2119
- [10] Shi S C 2012 *Sci. China: Inform. Sci.* **55** 120
- [11] Jiang Y, Jin B B, Xu W W, Kang L, Chen J, Wu P H 2012 *Sci. China: Inform. Sci.* **55** 64
- [12] Jiang L, Miao W, Zhang W, Li N, Lin Z H, Yao Q J, Shi S C, Svechnikov S I, Vakhtomin Y B, Antipov S V, Voronov B M, Kaurova N S, Gol'tsman G N 2006 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **54** 2944
- [13] Miao W, Zhang W, Zhong J Q, Shi S C, Delorme Y, Lefevre R, Feret A, Vacelet T 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 052605
- [14] Zhang W, Khosropanah P, Gao J R, Kollberg E L, Yngvesson K S, Bansal T, Barends R, Klapwijk T M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 111113
- [15] Zhou K M, Miao W, Lou Z, Hu J, Li S L, Zhang W, Shi S C, Lefevre R, Delorme Y, Vacelet T 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 2300805
- [16] Kohler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere H E, Linfield E H, Davies A G, Ritchie D A, Iotti R C, Rossi F 2002 *Nature* **417** 156
- [17] Gao J R, Hovenier J N, Yang Z Q, Baselmans J J A, Baryshev A, Hajenius M, Klapwijk T M, Adam A J L, Klaassen T O, Williams B S, Kumar S, Hu Q, Reno J L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 244104
- [18] Hubers H W, Pavlov S G, Semenov A D, Kohler R, Mahler L, Tredicucci A, Beere H E, Ritchie D A, Linfield E H 2005 *Opt. Express* **13** 5890
- [19] Khosropanah P, Baryshev A, Zhang W, Jellema W, Hovenier J N, Gao J R, Klapwijk T M, Paveliev D G, Williams B S, Kumar S, Hu Q, Reno J L, Klein B, Hesler J L 2009 *Opt. Lett.* **34** 2958
- [20] Danylov A A, Light A R, Waldman J, Erickson N R, Qian X F, Goodhue W D 2012 *Opt. Express* **20** 27908
- [21] Barkan A, Tittell F K, Mittleman D M, Dengler R, Siegel P H, Scalari G, Ajili L, Faist J, Beere H E, Linfield E H, Davies A G, Ritchie D A 2004 *Opt. Lett.* **29** 575
- [22] Amanti M I, Scalari G, Castellano F, Beck M, Faist J 2010 *Opt. Express* **18** 6390
- [23] Ren Y, Hovenier J N, Higgins R, Gao J R, Klapwijk T M, Shi S C, Bell A, Klein B, Williams B S, Kumar S, Hu Q, Reno J L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 161105
- [24] Ren Y, Hayton D J, Hovenier J N, Cui M, Gao J R, Klapwijk T M, Shi S C, Kao T Y, Hu Q, Reno J L 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 101111
- [25] Ren Y, Hovenier J N, Cui M, Hayton D J, Gao J R, Klapwijk T M, Shi S C, Kao T Y, Hu Q, Reno J L 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 041111
- [26] Richter H, Semenov A D, Pavlov S G, Mahler L, Tredicucci A, Beere H E, Ritchie D A, Il'in K S, Siegel M, Hubers H W 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 141108
- [27] Miao W, Lou Z, Xu G Y, Hu J, Li S L, Zhang W, Zhou K M, Yao Q J, Zhang K, Duan W Y, Shi S C, Colombelli R, Beere H E, Ritchie D A 2015 *Opt. Express* **23** 4453
- [28] Xu G Y, Li L H, Isac N, Halioua Y, Davies A G, Linfield E H, Colombelli R 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 091112
- [29] Wanke M C, Young E W, Nordquist C D, Cich M J, Grine A D, Fuller C T, Reno J L, Lee M 2010 *Nat. Photon* **4** 565
- [30] Miao W, Zhang W, Zhou K M, Li S L, Zhang K, Duan W Y, Yao Q J, Shi S C 2013 *Supercond. Sci. Tech.* **26** 085005
- [31] Irwin K D, Hilton G C 2005 *Transition-Edge Sensors* (Springer: Cryogenic Particle Detection in Topics in Applied Physics) pp63–150
- [32] Zhang W, Zhong J Q, Miao W, Duan W Y, Yao Q J, Shi S C, Martino J, Pajot F, Prele D, Voisin F, Piat M 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 2100204
- [33] Zhang Q Y, Wang T S, Liu J S, Dong W H, He G F, Li T F, Zhou X X, Chen W 2014 *Chin. Phys. B* **23** 118502
- [34] Datta R, Hunnmayr J, Munson C, Austermann J, Beall J, Becker D, Cho H M, Halverson N, Hilton G, Irwin K, Li D, McMahon J, Newburgh L, Nibarger J, Niemack M, Schmitt D, Smith H, Staggs S, van Lanen J, Wollack E 2014 *J. Low Temp. Phys.* **176** 670

SPECIAL ISSUE—Terahertz physics

Terahertz high-sensitivity superconducting detectors*

Shi Sheng-Cai[†] Li Jing Zhang Wen Miao Wei*(Millimeter and Sub-Millimeter Wave Laboratory, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences,
Nanjing 210008, China)**(Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)*

(Received 21 April 2015; revised manuscript received 2 June 2015)

Abstract

The terahertz regime, as a last radio window, remains to be fully explored, and astronomical and atmospheric observations in this regime are scientifically important. Like other frequency regimes, developing high-sensitivity detectors (coherent and incoherent) is of particular significance for both ground-based and space-borne facilities. As the coherent detector of choice below 1.4 THz, superconductor-insulator-superconductor (SIS) heterodyne mixers have achieved as high a sensitivity as five times the quantum limit around 1.4 THz. It is, however, still a challenge to developing SIS mixers at frequencies beyond 1.4 THz with considerable transmission loss in superconducting circuits due to the Cooper-pair breaking by energetic photons and increased many difficulties in designing and fabricating.

So far, superconducting hot electron bolometer (HEB) mixers have been the most sensitive heterodyne detectors at frequencies above 1.5 THz, and successfully used to detect molecular spectral lines up to 2.5 THz from ground-based and space telescopes. Although spiral-antenna coupled NbN HEB mixers show a good sensitivity in the whole THz frequency range, the directly measured spectral response with Fourier transform spectrometer falls quickly as frequency increases, especially above 3 THz.

The terahertz band is also of particular importance to observe astronomical objects such as cosmic microwave background, early distant objects, cold objects and dusty objects. Aiming at such objects, we develop a terahertz imaging array system by combining advanced superconducting detectors such as transition edge sensor (TES) and microwave kinetic inductance detectors (MKIDs), thus the system has a frequency band centred at 350 μm , an operational temperature of 0.3 K, and a sensitivity reaching background limit performance for ground-based applications. In addition, it is expected to have some breakthroughs in ultra-sensitive superconducting TES and MKID, low noise multi-channel readout and multiplexing, efficient terahertz-wave coupling technology, and large-scale array system integration. The developed terahertz imaging array system will serve as the next-generation instrument of Dome A 5 m terahertz telescope, conducting a 350 μm -band legacy survey for studying the planets, stars, galaxies and cosmology. Besides the application in astronomy, the developed terahertz imaging array system can also be applied to some areas requiring rapid detection such as security, deep space exploration, and biomedical imaging.

In this paper, we mainly introduce the superconducting detectors developed at Purple Mountain Observatory and those for international collaborative projects.

Keywords: terahertz, superconductor, sensitivity, detector**PACS:** 85.25.Pb, 85.25.Am, 95.55.Jz**DOI:** 10.7498/aps.64.228501

* Project supported by the National Major Scientific Instruments Development Project, China (Grant No. 11127903), the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11190012), the “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB04010300), and the Outstanding Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11422326, 11222329).

[†] Corresponding author. E-mail: scshi@pmo.ac.cn