

太赫兹超导阵列成像系统

中国科学院紫金山天文台

仪器研发背景

太赫兹 (THz) 波段一般定义为 0.1—10 THz 的频率区间, 覆盖短毫米波至亚毫米波 (远红外) 频段。人们早已认识到该波段在天文学、物理学、材料科学、生命科学、信息科学等领域的重要科学意义及丰富应用前景。但长期以来, 由于太赫兹探测及信号产生技术的严重缺乏, 导致该波段至今还是一个有待全面研究和开发应用的电磁波段。在天文学领域, 太赫兹及远红外谱段观测几乎涉及当代天文学的所有基本问题, 尤其在恒星及其行星系统的形成与演化、早期宇宙演化等前沿领域研究中具有不可替代的作用。

由于地球大气中的水蒸气会强烈吸收太赫兹电

磁辐射, 导致地球上绝大部分区域在这一电磁谱段均不透明, 即难以实现地面天文观测。即使是位于智利 Atacama 沙漠海拔 5 000 m 以上高原建设的世界最大的毫米级/亚毫米级地面射电望远镜阵列 ALMA, 也只能在 1 THz 以下频段通过几个有限的大气窗口观测。南极冰穹 A 具有高海拔和极低温的特点, 是国家重大科技基础设施建设“十二五”重点规划项目之一“中国南极天文台”(包括一台 5 m 太赫兹望远镜)的候选台址, 但该站址还缺乏太赫兹远红外谱段大气透过率和水汽含量等的系统测量。

主要进展

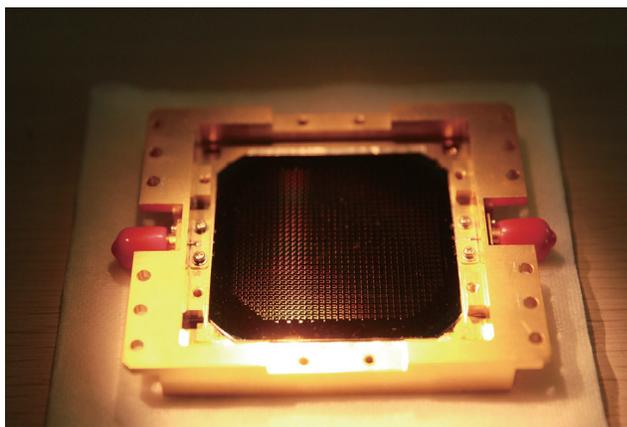
通过与美国哈佛-史密松天体物理中心等合作, 项目团队成功研制了国际上首例无人值守运行的超宽带 (0.75—15 THz) 傅里叶光谱仪。经过长达 19 个月极端环境下的连续运行, 获得了国际上首次对南极冰穹 A 太赫兹远红外谱段大气透过率的长周期实测数据, 揭示南极冰穹 A 具有地球上独一无二的太赫兹远红外天文观测新窗口。相关研究结果发表于《自然》杂志子刊《自然-天文学》(Nature Astronomy) 创刊号。

南极冰穹 A 为开展太赫兹远红外天文学与大气科学研究提供了新机遇。开展这一谱段的天文及大气观测极大地依赖于高灵敏度超导探测器。在除干涉阵以外的太赫兹天文望远镜上, 大规模阵列成像探测器都是重要观

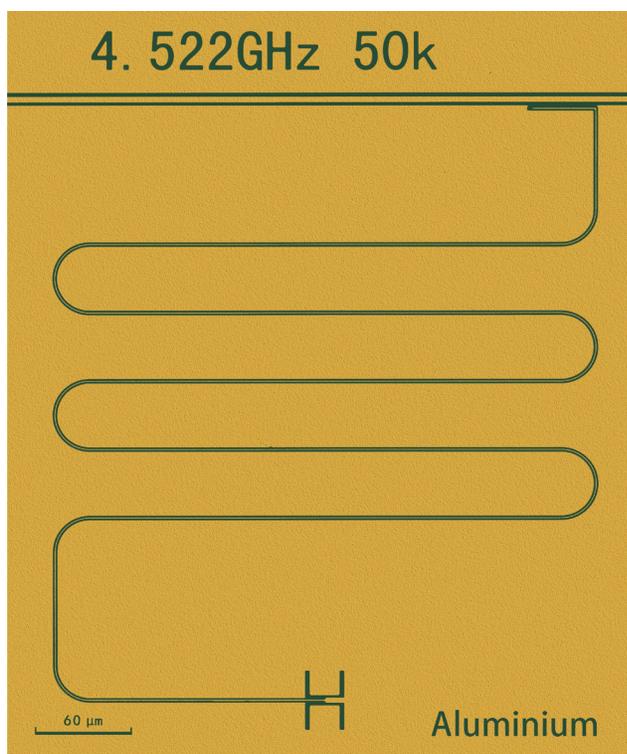


64 像元 TES 探测器阵列芯片

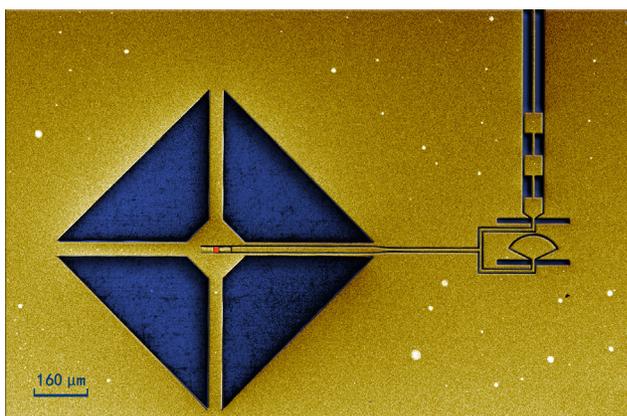
执笔人: 史生才, 李婧, 张文, 林镇辉, 缪巍, 毛瑞青, 王红池



1024 像元 MKIDs 探测器阵列芯片



MKIDs 探测器单像元



TES 探测器单像元局部

测设备，主要用于太赫兹波段的大天区成像巡天，为行星、恒星、星系和宇宙学研究提供这一独特波段的巡天“传世”数据库。另外，大规模阵列成像探测器配合二维光谱仪是宇宙星际介质性质诊断和宇宙学距离上天体红移精确测定的独特手段。

近年来，随着超高灵敏度超导相变边缘探测器（TES）和超导动态电感探测器（MKIDs）及其大规模读出复用技术的突破，太赫兹波段大规模阵列成像探测器以及超宽带频谱仪技术等得到快速发展。这些新观测技术使高红移富尘埃星系的探测和大规模亚毫米波连续谱巡天成为可能，为早期宇宙、星系形成以及恒星形成初始条件等研究领域带来前所未有的突破性进展。

针对南极冰穹 A 5 m 太赫兹望远镜（DATE5）的科学需求，本项目主要研制一台 $350\ \mu\text{m}$ 波段 32×32 像元超导阵列成像系统，灵敏度需达到地面观测设备背景极限，即等效噪声功率 NEP 优于 $1 \times 10^{-16}\ \text{W/Hz}^{0.5}$ 。紫金山天文台毫米波和亚毫米波技术实验室历时 5 年时间，攻克了国际前沿的超导 TES 和 MKIDs 探测器技术，成功研制了该仪器设备。仪器的探测灵敏度优于地面观测设备背景极限，整体性能处于国际同类探测器系统的前沿水平。

本项目突破了仪器的核“芯”技术——即太赫兹超导探测器阵列芯片技术。首次实现了 32×32 像元超导 MKIDs 探测器以及 8×8 像元超导 TES 探测器二维阵列芯片的自主设计与制备，这是我国太赫兹超导探测器阵列芯片技术“零”的突破。

核心关键技术

所研制仪器的关键技术突破及创新点主要包括：

(1) 基于单层氮化钛（TiN）和铝（Al）两种超导薄膜，在 3 英寸硅及蓝宝石衬底上成功制备了像元数达 32×32 、实测 NEP 达 $10^{-17}\ \text{W/Hz}^{0.5}$ 的超导 MKIDs 探测器芯片，像元数及灵敏度均达国际同类探测器的前沿水平。

(2) 提出了一种新型的太赫兹超导 TES 探测器。在硅及 SOI 衬底上成功制备出高质量超导 Ti 膜, 临界温度在 300—450 mK 之间可调控。此外, 发展了一种 KOH 湿刻工艺, 实现了具有电子-声子去耦传热机制的 8×8 像元超导 TES 探测器芯片制备, 实测 NEP 达 10^{-17} W/Hz $^{0.5}$ 量级, 灵敏度达到国际同类探测器的水平。

(3) 基于商用宽带任意波形发生器及数字 FFT 频谱仪, 实现大规模 MKIDs 探测器阵列 FDM 模式读出。基于 Python 开发环境, 实现大规模 MKIDs 探测器阵列特性分析的 Pipeline 数据处理流程, 包括基线拟合、谐振峰值证认/谐振参数拟合以及特性分析。

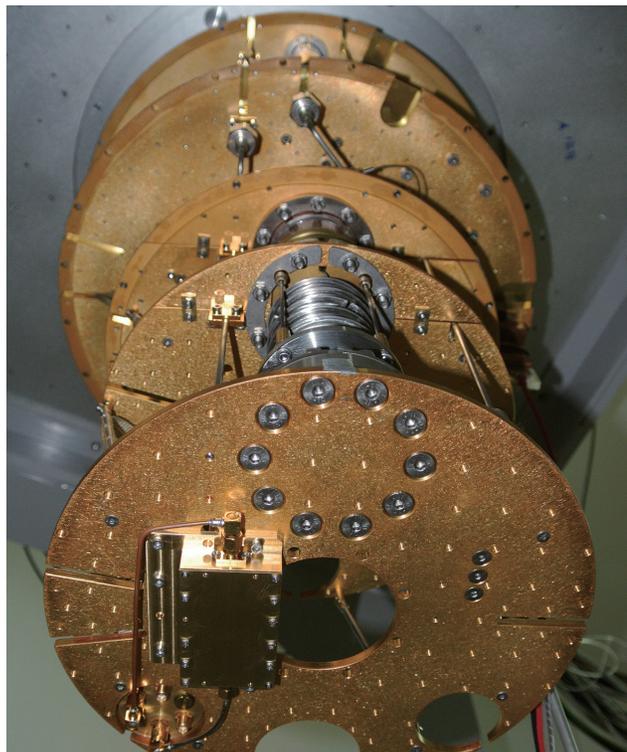
(4) 基于商用 4 K GM 机械闭环制冷机与 0.3 K He 3 /He 4 吸附制冷器, 采用新型结构的多自由度约束、凯夫拉线悬置固定绝热以及无氧铜带低温导热连接方式等, 自主研发了一套低漏热的 300 mK 低温测量平台, 性能指标达到商用产品国际先进水平。

(5) 建立了一套基于硅微透镜阵列、冷光学透镜和常温光学反射镜的大视场准光学成像设计方法, 应用于 850 μm 和 350 μm 成像演示系统的准光学设计中, 并综合利用几何光学、高斯波束传播理论和并行物理光学算法对准光学系统进行快速和精确的电磁仿真。

应用

“太赫兹超导阵列成像系统”通过攻克国际前沿的高灵敏度、大规模阵列超导探测器技术, 实现了面向天文应用为主的仪器研制。项目成果转化及应用情况如下。

(1) 研制成功的基于超导 MKIDs 探测器的 32×32 像元太赫兹超导阵列成像系统, 将作为中国南极天文



mK 量级低温制冷系统

台 5 m 太赫兹望远镜 DATE5 的下一代主观测设备, 还有望应用于东亚天文台 JCMT 亚毫米波望远镜、中国台湾“中研院”天文所 (ASIAA) 与美国哈佛-史密松天体物理中心 (CfA) 联合研制的 GLT 望远镜以及美国 Caltech 拟移址智利的 CSO 望远镜, 开展太赫兹天文领域若干前沿科学问题的研究。

(2) 研制成功的超导 TES 探测器技术适用于毫米波到 γ 射线的电磁谱段, 将推广应用于毫米波段宇宙微波背景辐射观测, 研究原初引力波等重要科学问题; 推广应用至 X 射线高能量分辨率探测, 研究宇宙重子及黑洞等高能天体物理前沿科学问题, 以及应用于 X 射线脉冲星导航; 推广应用于量子信息领域的高效率单光子探测等。

专家点评

太赫兹超导阵列成像系统的研制，为太赫兹天文及其他应用领域提供了国际前沿水平的大规模阵列成像探测手段。该系统研制过程中，主要开展了基于两种超导薄膜的 MKIDs 和 TES 探测器设计、制备和特性研究，以及与仪器系统相关的太赫兹波高效输运与耦合技术、低功耗多路读出复用技术和大规模阵列集成技术等研究；研制了 350 μm 波段 1024 像元太赫兹超导阵列成像系统，并实现了原理样机的天文试验观测演示和实验室演示。该系统突破了高灵敏度大规模超导探测器阵列的设计制备技术和亚 K 工作温区太赫兹超导阵列成像系统的集成技术，达到了预定的技术指标，并且在工作频段、像元数、探测器灵敏度等方面均达到了国际同类探测器的前沿水平。

——吴培亨，中国科学院院士，南京大学教授