

超导探测器与太赫兹天文应用

任远 缪巍 史生才[†]

(中国科学院紫金山天文台 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210023)

2023-03-15 收到

[†] email: scshi@pmo.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20230405

Superconducting detectors and their applications in terahertz astronomy

REN Yuan MIAO Wei SHI Sheng-Cai[†]

(Key Laboratory for Radio Astronomy Technology of CAS, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China)

摘要 太赫兹频段(0.1—10 THz)占有宇宙空间近一半的光子能量, 特别适合观测早期遥远天体、正在形成冷暗天体, 以及被尘埃遮掩天体, 且具有非常丰富的分子、原子及离子谱线, 是其他频段不可替代的宇宙观测窗口。近四十年来, 低温超导探测器技术得到快速发展, 在天文学领域率先实现应用并取得系列有显著影响的研究成果, 如黑洞成像、原行星盘精细结构观测以及近邻宇宙水分子刻画和宇宙最先生成的电离氢化氮离子探测等。文章将主要介绍4种国际主流太赫兹超导探测器(即超导隧道结(SIS)混频器、超导热电子(HEB)混频器、超导相变边缘(TES)探测器和超导动态电感(KID)探测器)的研究进展、应用突破和未来发展趋势。

关键词 超导探测器, 太赫兹探测, 天文学观测

Abstract The terahertz frequency band (loosely defined as 0.1—10 THz) occupies approximately half of the photon energy in the universe and is particularly suitable for observing early distant objects, cold objects, and dusty objects. It also has very rich molecular, atomic and ion spectral lines, which are very important tracers for studying the dynamics of astronomical objects such as stars and planetary systems. In the past 40 years, low-temperature superconducting detector technology has rapidly developed, and has been widely applied in astronomy. A series of significant results have already been achieved, such as the imaging of black holes, the observation of the fine structure of protoplanetary disks, the characterization of water molecules in nearby universes, and the detection of the first molecule (HeH^+) ever formed in the universe. In this paper we describe the recent research, application breakthroughs and future development trends of four kinds of terahertz superconducting detectors, namely, SIS mixers, HEB mixers, TES detectors, and KID detectors.

Keywords superconducting detectors, terahertz detection, astronomical observation

1 引言

太赫兹(terahertz, THz)频段一般定义为0.1—10 THz的频率区间,对应波长为3 mm至30 μm 波段,介于微波和红外之间。在天文学领域,太赫兹频段具有独特优势。首先,太赫兹频段汇聚了宇宙微波背景辐射之后接近50%的宇宙不同红移处各类天体辐射能量(相当于紫外、可见光和近红外波段辐射能量的总和)。其次,太赫兹频段最适合观测形成阶段的冷暗天体(典型温度为10 K,对应光谱辐射峰值约在1 THz频段)、早期遥远天体(其紫外与可见光辐射被星际尘埃吸收后产生更长波段的连续谱辐射,多普勒频移效应将其转移至太赫兹频段)、以及被尘埃遮掩天体(太赫兹频段星际介质遮掩远弱于可见光/近红外,即太赫兹频段的穿透性)。另外,太赫兹频段含有丰富的分子、原子和离子谱线,使得太赫兹频段成为研究天体物理化学性质及动力学特征的独特频段。因此,太赫兹频段在当代天文学前沿研究中具有特别重要的作用^[1-3],对于理解宇宙状态和演化(包括早期宇宙演化、恒星和星系形成、行星及行星系统形成等)具有非常重要的意义。

20世纪90年代以来,太赫兹频段天文观测已经取得若干有显著影响的研究成果,如利用宇宙微波背景辐射精确测量宇宙学参数、亚毫米波星系发现、原行星盘精细结构观测、黑洞成像,以及近邻宇宙水分子刻画和宇宙最先诞生的电离氢

化氢离子(HeH^+)探测等^[4-9]。在上述重要的太赫兹天文观测发现中,WMAP、Planck、Herschel、SOFIA等空间及地基望远镜,SPT、JCMT、IRAM、SMA、ALMA等地面望远镜及阵列发挥了重要作用。值得指出的是,太赫兹天文得以快速发展主要得益于超高灵敏度及大规模阵列低温超导探测器技术的进步。目前国际主流的低温超导探测器包括:超导隧道结(superconductor-insulator-superconductor, SIS)混频器^[10]、超导热电子(hot-electron bolometer, HEB)混频器^[11]、超导相变边缘探测器(transition edge sensor, TES)^[12],以及超导动态电感探测器(kinetic inductance detector, KID)^[13],前两种主要针对高光谱分辨率探测,后两种主要针对大规模成像及宽带成像光谱探测。本文将主要介绍这4种国际主流太赫兹超导探测器的研究进展、应用突破和未来发展趋势。

2 太赫兹超导混频器及超高光谱分辨率探测应用

太赫兹混频器是通过将太赫兹信号和本振参考信号混频从而产生中频信号,可同时探测信号幅度和相位信息。天文观测应用中,太赫兹混频器主要是用于分子转动谱线和原子精细结构谱线的超高光谱分辨率探测(光谱分辨率大于 10^6),研究星际介质循环、恒星形成、宇宙生命环境等前沿科学问题。此外,太赫兹混频器也是构建超高空间分辨率干涉阵的核心技术。超导混频器是目前太赫兹频段灵敏度最高的混频器,具有接近量子噪声极限($h\nu/k_B$, h 为普朗克常数, ν 为频率, k_B 为玻尔兹曼常数)的灵敏度,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。

目前,国际主流的太赫兹超导混频器是基于低温超导体的超导SIS混频器和超导HEB混频器,前者主要工作在1 THz以下频段,

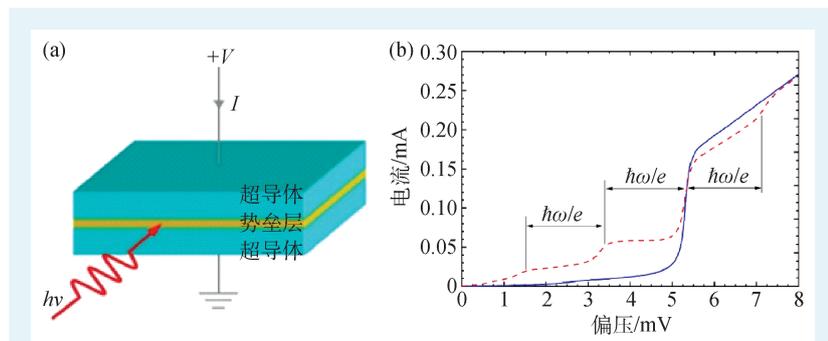


图1 (a)超导SIS混频器结构图;(b)有(红色虚线)无(蓝色实线)太赫兹辐照时超导SIS混频器电压—电流特性曲线。太赫兹辐照后,出现光子辅助准粒子隧穿效应台阶,每个光子台阶对应电压宽度是 $h\omega/e$ (h 为约化普朗克常数, ω 为太赫兹辐照频率, e 为电子电荷),光子台阶高度与太赫兹辐照功率相关

后者主要在 1 THz 以上频段应用。

2.1 超导隧道结(SIS)混频器

超导 SIS 混频器是由超导体—势垒层—超导体结构构成,如图 1(a)所示。20 世纪 60 年代初期,英国物理学家 B. Josephson 理论预言了超导体—势垒层—超导体中存在约瑟夫森效应^[14],而挪威物理学家 I. Giaever 实验发现了超导体中的准粒子隧穿效应^[15],自此开始了基于准粒子隧穿效应的混频实验研究。图 1(b)是典型的超导 SIS 混频器有无太赫兹辐照的电压—电流特性。可以看出,超导 SIS 混频器的伏安特性有两个典型特征,超低暗电流和超强的非线性,前者决定了超导 SIS 混频器的噪声特性,后者决定了变频增益,两者共同定义了混频特性。20 世纪 70 年代末至 80 年代初,美国物理学家 J. Tucker 等建立了基于光子辅助准粒子隧穿效应的量子混频理论^[10],并预言超导 SIS 混频器噪声可达量子噪声、可实现变频增益以及具有负阻效应等重要结果。在实验方面,美国贝尔实验室的 M. Gurvitch 等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^[16],使得超导 SIS 混频器器件制备的可靠性及质量得到大幅提升。自此以后,太赫兹频段超导 SIS 混频器技术得到快速发展。目前,基于铌材料的超导 SIS 混频器在 1 THz 以下频段灵敏度已突破 3—5 倍量子噪声^[17],中频瞬时带宽接近 20 GHz,几乎是地面在建及规划的大型亚毫米波/太赫兹望远镜高光谱分辨率探测终端(外差混频接收机,相干探测)的唯一选择。

超导 SIS 混频器的工作频段受超导材料能隙频率(铌材料能隙频率约为 0.7 THz)限制。在能隙以上频率超导 SIS 混频器的灵敏度将急剧恶化,主要原因是当光子频率高于超导材料能隙频率时,会拆散混频电路超导体中的库珀对(Cooper pair),导致能量损耗^[18, 19]。因此,发展高能隙频率的超导 SIS 混频器进而不断提升其工作频段是该领域的重要研究方向。2008 年,中国科学院紫金山天文台在国际上率先开展了基于高能隙材料氮化铌的超导 SIS 混频器技术研究,成功制备了氮化铌

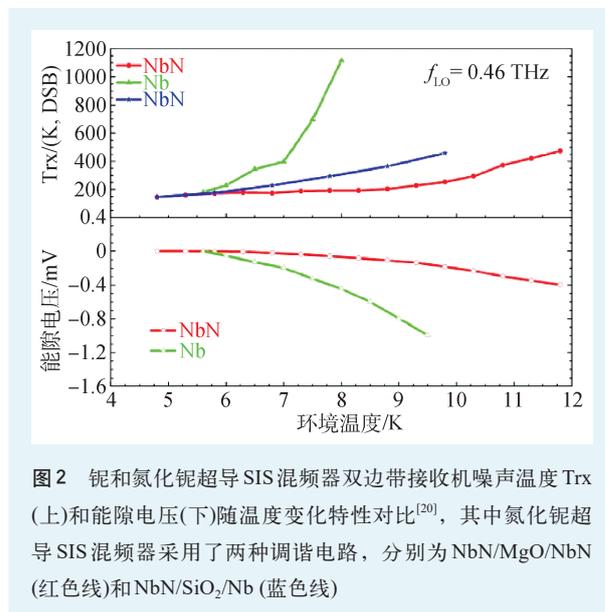


图2 铌和氮化铌超导 SIS 混频器双边带接收机噪声温度 T_{rx} (上)和能隙电压(下)随温度变化特性对比^[20],其中氮化铌超导 SIS 混频器采用了两种调谐电路,分别为 NbN/MgO/NbN (红色线)和 NbN/SiO₂/Nb (蓝色线)

超导 SIS 混频器器件,并系统研究了各项物理特性,实验揭示了其在约瑟夫森噪声干扰抑制和工作温度区间拓宽(图 2)等方面的明显优势^[20]。环境温度 4.8 K 时,氮化铌超导 SIS 混频器在 0.46 THz 频段实测未校准双边带接收机噪声温度约为 150 K,优于 7 倍量子极限,这是该频段氮化铌超导 SIS 混频器实现的最好噪声性能,基本达到了传统铌超导 SIS 混频器的噪声水平。另外,美国加州理工学院也开展了基于高能隙材料铌钛氮的超导 SIS 混频器技术研究,在 0.8 THz 频段实测铌钛氮超导 SIS 混频接收机噪声温度约为 260 K^[21]。

2.2 超导热电子(HEB)混频器

对于 1 THz 以上频段,超导 HEB 混频器是目前灵敏度最高的混频器。图 3(a)是超导 HEB 混频器器件照片,它由超导微桥和射频耦合电路构成。超导微桥是一层几纳米厚的超导薄膜,其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。图 3(b)是超导 HEB 混频器内热输运机制示意图,太赫兹辐射经由射频耦合电路馈入超导微桥,超导微桥中处于低温平衡态的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。此外,超导微桥中电子吸收的能量也可以通过电子运动扩散到两端电极而恢复平衡态。20世纪90年代以来,随着对超导HEB混频器物理机理的深入理解和器件制备工艺的逐渐成熟,超导HEB混频器已能够覆盖1—5 THz全频段,噪声温度突破5倍量子噪声^[22-24]。

尽管太赫兹超导HEB混频器研究已经取得了很大进步,但其物理机制尚未完全解明。广为利用的理论框架是简单的热点模型(hot spot model)^[25]:假定超导微桥中心区域是一个电阻性热点,其尺寸取决于直流和本振参考信号功率,微桥中心点电子温度接近超导微桥临界转变温度。热点模型可以较好地解释超导薄膜能隙以上频率的太赫兹波吸收与电声相互作用等行为,但在能隙以下频率仍难以解释实测电压—电流与电阻—温度等特性。对于基于高能隙超导薄膜(具有更高的能隙频率)超导HEB混频器,这一问题将愈加突出。针对此问题,中国科学院紫金山天文台率先提出超导HEB混频器中太赫兹辐射非均匀吸收概念^[26],并引入涡旋—反涡旋对拆散非热效应^[27],建立了超导HEB混频器的首个频率相关热点模型,揭示了超导HEB混频器可覆盖全太赫兹频段的高灵敏度特性。基于频率相关热点模型,模拟仿真发现超导HEB混频器高频特性与归一化工作温度的普适规律,并得到了实验验证^[28]。在上述工作基础上,中国科学院紫金山天文台研制了1.4 THz频段平面双槽天线耦合的超导HEB混频器。通过在器件制备过程中应用电子束曝光一次性形成接触电极和平面天线技术,有效降低了射

频传输损耗,1.4 THz频段实测接收机噪声温度为500 K^[29]。近期,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,成功研制了国际最高频率(28.1 THz)准光天线耦合型超导HEB混频器^[30],以及背向耦合本振参考信号的超导HEB混频器^[31]。

除了高灵敏度混频器,太赫兹外差混频接收机系统中还需要具有高频率和功率稳定度的太赫兹本振参考源。基于倍频器的固态振荡源技术已经发展相对成熟,成为在2 THz以下频段太赫兹信号产生技术的首选。在太赫兹高频段(2 THz以上频段),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半导体源——太赫兹量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)取得了飞速发展。太赫兹量子级联激光器的同步稳幅锁频技术和波前相位整合技术研究成为2 THz以上频段高分辨率谱线探测的突破口。中国科学院紫金山天文台与荷兰空间研究所(SRON)、美国麻省理工学院(MIT)合作,采用气体吸收谱线(甲醇分子谱线)与高速可调光阑(音圈电机)双路反馈控制,在国际上率先实现对太赫兹量子级联激光器辐射的同步稳幅锁频,进而成功构建首个兼具高光谱分辨率与高稳定性的集成超导HEB混频器和量子级联激光器的混频接收机系统,量子级联激光器线宽小于35 kHz,光谱分辨率优于 10^8 ,系统有效积分时间提高了30倍。基于所研制的太赫兹

外差混频接收机系统,在国际上首次实现太赫兹频段甲醇气体分子谱线的实验室高光谱分辨率相干探测(图4),为分子谱线波谱研究提供了重要的参考依据^[32-34]。

另外,中国科学院紫金山天文台与上海技术物理研究所和上海微系统与信息技术研究所等机构合作,采用“束缚态至连续态跃迁”有源区结构的低功耗单模量子级联激光器,有效抑制了量子级联激光器热功耗对超导HEB混频器特性的影响。

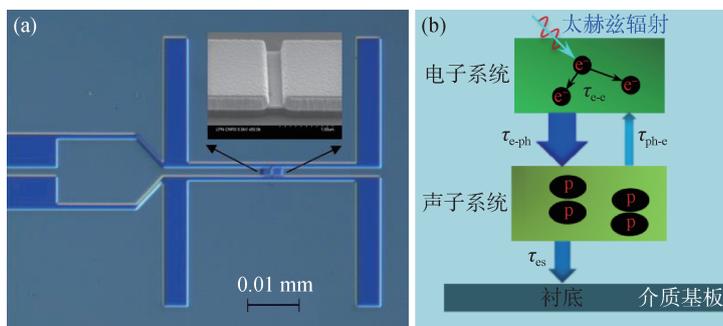


图3 (a)超导HEB混频器器件照片;(b)超导HEB混频器内热输运机制示意图

基于天线阵理论对太赫兹量子级联激光器辐射光束进行了精确模拟仿真与整形,使超导HEB混频器与量子级联激光器间信号耦合效率提高近一个量级。在此基础上,实现了迄今最高集成度的太赫兹超导HEB混频器与量子级联激光器外差混频接收机系统(图5),在2.5 THz频段实测接收机噪声温度仅为800 K,优于7倍量子噪声^[35, 36]。

2.3 超高光谱分辨率探测应用

太赫兹超导SIS混频器和超导HEB混频器目前已广泛应用于天文超高光谱分辨率探测,在天体物理及宇宙学等前沿研究中发挥着重要作用。例如,国际最大太赫兹天文望远镜ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)采用超导SIS混频器,成功实现了原行星盘高分辨率结构成像^[5, 37];太赫兹天文望远镜ALMA与其他多个太赫兹天文望远镜(均采用超导SIS混频器作为探测终端)组成“事件视界望远镜”,成功在太赫兹波段拍摄到人类首张黑洞照片^[7];太赫兹空间天文台Herschel基于超导SIS混频器,首次探测到原行星盘内冷气态水分子^[8]以及发现银河系及近邻星系中普遍存在复杂丝状(filament)网络结构等。国内方面,超导SIS混频器已被成功应用于青海13.7 m毫米波望远镜和POST亚毫米波望远镜,以及我国西藏羊八井“多波段多大气成分主被动综合探测系统”等。2008年,中国科学院紫金山天文台采用高能隙氮化铌超导SIS混频器进行了天文观测,获得首条基于氮化铌超导SIS混频器的天文观测谱线^[20]。近期,中国科学院紫金山天文台承担了我国载人空间站工程巡天空间望远镜中高灵敏度太赫兹探测模块的研制任务,该模块采用0.41—0.51 THz频段氮化铌超导SIS混频器作为探测终端。另一方面,超导HEB混频器也被广泛应用于太赫兹天文望远镜,如太赫兹空间天文台Herschel、地面APEX(Atacama Pathfinder Experiment)望远镜等。近期,同温层红外机载天文台SOFIA基于超导HEB混频器,成功探测到宇宙最古老化学键电离氨离子谱线(HeH⁺, 2.01 THz),为揭示宇宙最早期的元素起

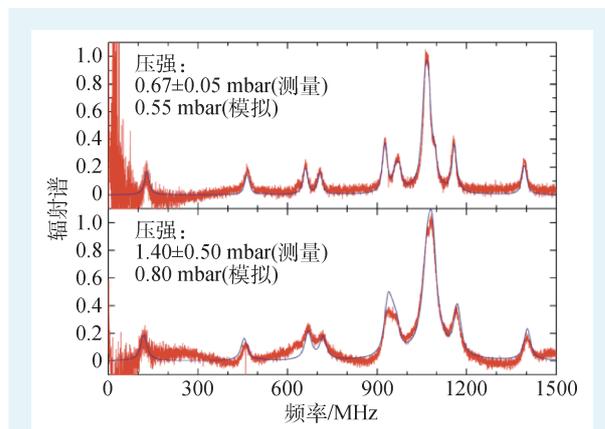


图4 3.5 THz频段低气压(上)和高气压(下)甲醇气体辐射特性的实验室高光谱分辨率谱线探测^[32]。高压时谱线基底变得不平整,主要是因为甲醇气体辐射功率增加,导致超导HEB混频器工作点发生变化

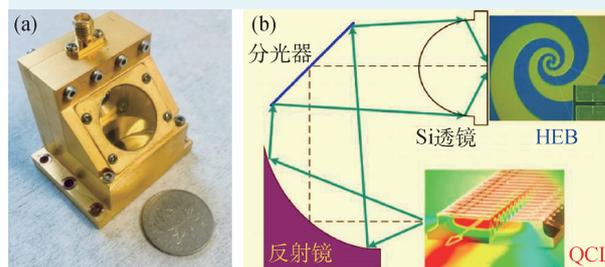


图5 太赫兹超导HEB混频器与量子级联激光器集成接收机实物图(a)和光学设计图(b)^[34]

源过程提供了重要依据^[9]。另外,欧美等国家新提出的GUSTO气球计划^[38]和ASTHROS气球计划^[39]也将采用超导HEB混频器作为探测终端。

为了满足未来太赫兹超高光谱分辨率探测,太赫兹超导SIS混频器和超导HEB混频器技术正朝着更宽、更高和更大三大方向发展。更宽是指超导混频器具有更宽的瞬时带宽(中频带宽)和射频带宽;更高是要求超导混频器工作频率更高,不仅能覆盖亚毫米波,还能覆盖中远红外波段;更大是指超导混频器拥有更多像元数。新一代超导外差混频接收机将是未来国内外空间和地面太赫兹望远镜的先进超高光谱分辨率探测终端。

3 大规模阵列超导成像探测器及应用

大规模阵列超导成像探测器是太赫兹天文望远镜的主要观测设备之一,用于大天区成像,研

究早期星系形成和演化以及原初引力波探测等前沿科学问题。超导成像探测器属于非相干探测器，可以将太赫兹辐射直接转换为可探测电信号。在原初引力波及亚毫米波星系等重要科学问题的驱动下，超导成像探测器技术，主要包括超导 TES 探测器和超导 KID 探测器，近年来得到快速发展。目前，超导成像探测器已具备背景噪声极限探测灵敏度(即噪声等效功率, noise equivalent power, NEP), 地面背景噪声极限灵敏度在 10^{-16} W/Hz^{1/2} 量级, 而空间背景噪声极限灵敏度约为 10^{-19} W/Hz^{1/2}。

3.1 超导相变边缘(TES)探测器

超导 TES 探测器是一种热探测器, 工作在超导—正常态转变区间, 吸收光子辐射后电子温度升高导致其电阻迅速增加从而实现高灵敏度探测^[12]。20 世纪 40 年代美国物理学家 D. Andrews 将一段细小钽线置于超导转变区并施加小偏置电流, 成功测量了红外辐射引起的电阻变化, 开创了辐射热探测计(bolometer)的先河。图 6(a)是超导 TES 探测器结构示意图, 由吸收体、电阻温度计、弱热连接、热沉等组成。通过恒压偏置将超导 TES 探测器偏置在超导—正常态转变区(图 6(b)), 吸收体吸收电磁辐射后温度明显升高, 引起超导 TES 探测器电阻增加, 导致电流急剧变化, 如图 6(c)所示。该电流变化可以通过低噪声超导量子干涉器件(superconducting quantum interference device, SQUID)读出。因为超导 TES 探测器是恒压偏置, 温度升高导致器件电阻增大, 焦

耳热反而减小, 形成独特的电—热负反馈机制, 使得超导 TES 探测器始终保持在超导转变区。

超导 TES 探测器与其他辐射热探测器的最大区别是采用了超导材料作为电阻温度计, 超导材料的选择决定了超导 TES 探测器的探测特性。超导 TES 探测器的热导(G)、热容(C), 以及噪声都与超导材料临界温度(T_c)有关。超导 TES 探测器的电阻性温度计通常采用三种形式的超导薄膜: 单层超导薄膜、双层超导薄膜, 以及合金超导薄膜^[12]。常用单层超导薄膜有 Ti、W 和 Hf 等^[40], 其临界温度 T_c 小于 1 K, 一般采用电子束蒸镀或磁控溅射制备, 调节薄膜制备工艺参数或者改变薄膜厚度可以在一定范围内调节临界温度 T_c 。第二种方法是在高真空条件下连续制备一层超导薄膜(Ti、Mo、Al、Ir 等)和一层金属膜(Au、Cu、Ag 等)形成双层超导薄膜。利用邻近效应可更精确地调控双层超导薄膜 T_c , 从而扩大超导材料的选择范围^[41]。第三种方法是制备合金超导薄膜(NbSi、AlMn 等)^[42], 通过改变两种材料配比调节临界温度 T_c 。

目前, 宇宙微波背景(cosmic microwave background, CMB)观测应用的超导 TES 探测器的 NEP 一般都达到地面背景噪声极限, 约为 $30-50 \times 10^{-18}$ W/Hz^{1/2}, 而气球项目应用的超导 TES 探测器的 NEP 会更高, 约为 1×10^{-17} W/Hz^{1/2}。荷兰空间研究所(SRON)为 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics)空间项目研制的红外波段超导 TES 探测器的 NEP 已接近 2×10^{-19} W/Hz^{1/2} ^[43]。中国科学院紫金山天文台自 2012 年开展了太赫兹超导 TES 探测器技术研究,

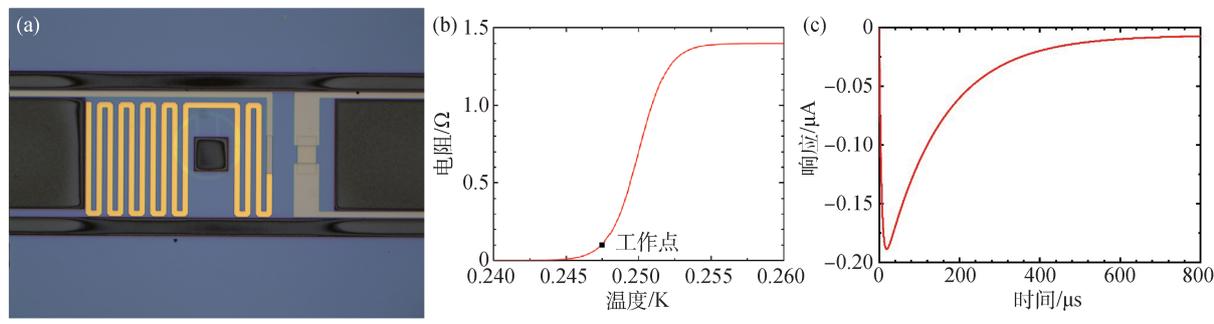


图6 超导 TES 探测器 (a)结构示意图; (b)电阻转变曲线; (c)脉冲响应

掌握了高质量Ti超导膜制备工艺,薄膜临界温度 T_c 在200—450 mK之间可调。采用湿刻硅工艺,实现了具有电子—声子去耦传热机制的 8×8 像元超导TES探测器阵列,在300 mK温区实测探测器NEP达到 10^{-17} W/Hz $^{1/2}$ 量级^[44]。

天文观测中,使用大规模超导TES探测器可以提高观测效率。大规模超导TES探测器的制备大都基于大尺寸晶圆,即采用光刻工艺在基板上制备多个探测器,并通过微加工工艺隔离每个探测器进而形成大规模超导TES探测器。另外,大规模超导TES探测器的信号读出需要与之配套的多路读出复用技术,从而减少读出引线数目并降低对制冷机制冷能力的需求。目前,常用多路读出复用技术有时分复用(time-division multiplexing, TDM)、码分复用(code-division multiplexing, CDM)、频分复用(frequency-division multiplexing, FDM),以及微波频分复用(microwave SQUID multiplexing, μ MUX)技术等^[45]。TDM发展最早,也相对成熟,但其噪声随着复用比的增加而增加,同时其可用带宽在MHz量级,复用比很难超过100:1,难以满足大规模超导TES探测器读出需求。CDM集成了时分复用的某些优点,噪声与复用比无关,但其调制解调算法较复杂。FDM的噪声同样与复用比无关,但是要求超导TES探测器交流偏置,会出现约瑟夫森弱连接效应。 μ MUX是新发展的多路读出复用技术,直流偏置超导TES探测器,感应产生的电流信号改变射频SQUID的有效电感,从而调节谐振器的谐振频率,其有效带宽为GHz,复用比超过1000:1,目前处于快速发展阶段。

3.2 超导动态电感(KID)探测器

超导KID探测器是一种工作在非平衡态的非相干超导探测器,微波信号通过共同的传输线耦合到每一个谐振器^[46]。超导KID探测器的谐振器基于超导薄膜制备,其谐振频率位于微波频段(约为GHz)。当足够能量的光子($h\nu > 2\Delta$, Δ 为超导体能隙)被超导薄膜吸收后拆散库珀对形成准粒子(图7(a)),引起准粒子态密度发生变化,进而改变

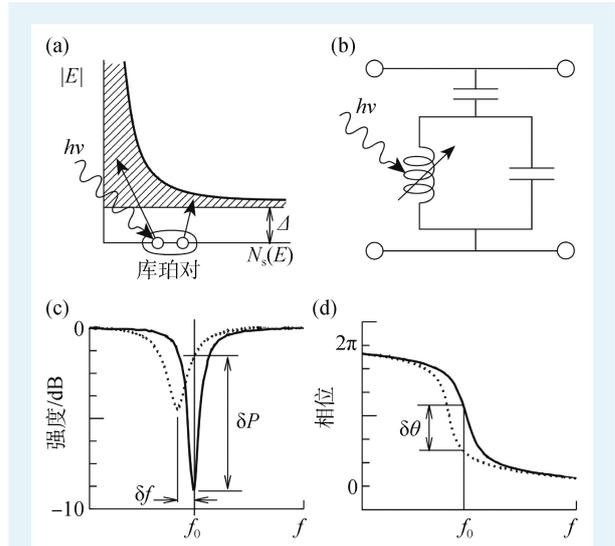
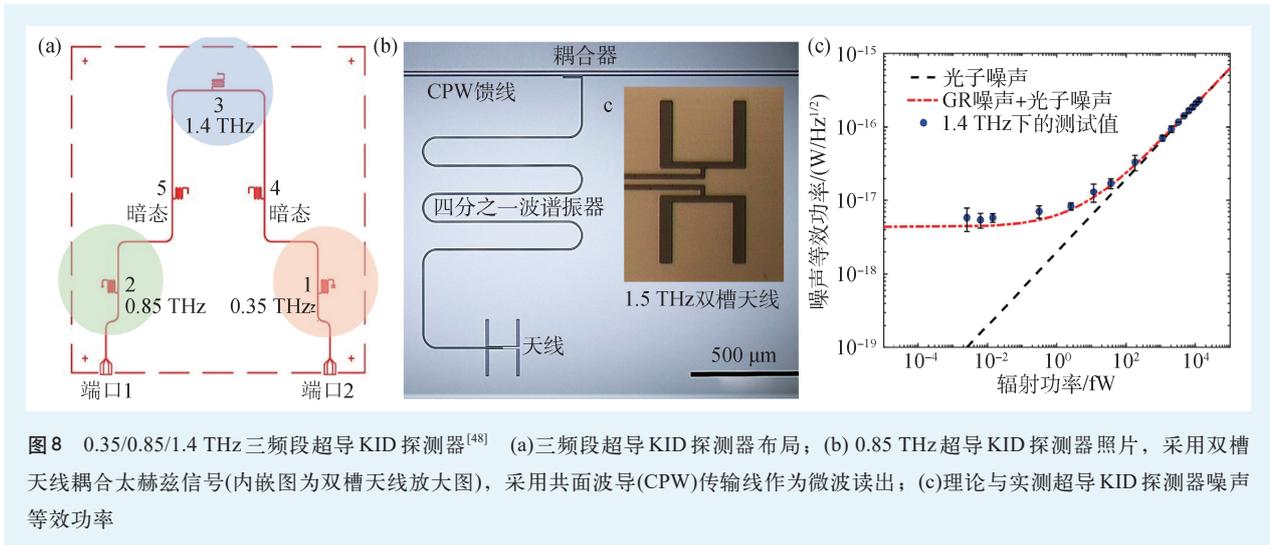


图7 超导KID探测器原理图^[46] (a)超导薄膜能带图; (b)超导谐振器等效电路; (c)超导谐振器谐振频率; (d)超导谐振器相位曲线

超导薄膜的动态电感(图7(b)),使得谐振器的谐振频率向低频偏移(图7(c)),同时谐振点的相位也会相应改变(图7(d))。处于超导态的超导薄膜本身没有损耗,品质因子高达 10^6 ,可高灵敏度探测太赫兹辐射。另一方面,通过设计不同像元的超导KID探测器响应在不同谐振频率,利用单一微波传输线即可实现多像元超导KID探测器频分复用读出,进而实现大规模超导KID探测器。总体上,超导KID探测器是基于超导薄膜,并采用平面工艺制备而成,制备工艺简单,有利于实现大规模成像探测器。

近年来,太赫兹超导KID探测器技术已经取得了快速发展。850 GHz频段天线耦合的961像元超导KID探测器实现了 3×10^{-19} W/Hz $^{1/2}$ 的探测灵敏度^[47]。进一步降低铝吸收体体积并刻蚀其下部衬底从而降低准粒子产生—重组(generation—recombination, GR)噪声贡献,可进一步提高超导KID探测器响应率/灵敏度约一个量级,满足未来空间天文观测的需求。中国科学院紫金山天文台经过近十年的持续攻关,已经突破大规模阵列超导KID探测器的设计及制备技术。基于单层氮化钛(TiN)和铝(Al)超导薄膜,自主研制了国内首个 32×32 像元超导KID探测器芯片,同时开发了大规模超导KID探测器频分复用读出电路及快速数



据处理软件, 实现了数据读出和管线处理流程等。在此基础上, 于同一芯片上基于超导Al膜制备了0.35/0.85/1.4 THz三频段超导KID探测器, 如图8所示, 每个频段超导KID探测器采用硅透镜和双槽天线耦合太赫兹信号。实验表明, 在1 pW以上太赫兹辐射时观测到光子涨落导致的背景噪声, 在1 fW以下太赫兹辐射时观测到GR噪声, 探测灵敏度达 $6 \times 10^{-18} \text{ W/Hz}^{1/2}$, 远优于地面背景噪声极限^[48]。

3.3 超导成像探测器天文应用

目前, 大规模超导成像探测器已广泛应用于太赫兹天文成像(如CMB偏振实验等)。在超导TES探测器天文应用方面, 位于夏威夷的JCMT望远镜的SCUBA-2探测终端采用了Mo/Cu双层膜超导TES探测器^[49], 工作频段为350/650 GHz, 每个频段探测器像元数为5120, 采用TDM读出技术, NEP约为 $10^{-16} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 。SCUBA-2在银河系恒星形成、邻近星系演化及高红移星系、太阳系行星大气等方面已取得了重要研究成果。此外, 超导TES探测器还广泛应用于CMB偏振实验。SPT(South Pole Telescope)望远镜SPTpol计划采用了双极化超导TES探测器, 探测器工作在90/150 GHz频段, 共计1560像元^[50], 采用了FDM读出。ACT(Atacama Cosmology Telescope)望远镜的ACTPol探测终端覆盖90/150 GHz两个频段, 包

含3068个超导TES探测器^[51], 采用TDM读出。CMB-S4是美国规划的下一代CMB观测计划^[52], 位于南极和智利的21台望远镜将安装像元数超过50万的超导TES探测器, 在基础物理、宇宙学、天体物理及天文学等领域将会产生革命性重大发现。中国科学院高能物理研究所联合国内外多家单位正在建设的AliCPT(Ali CMB Polarization Telescope)望远镜, 旨在北半球开展CMB偏振实验。AliCPT望远镜覆盖90/150 GHz两个频段, 拟采用基于Al-Mn双层膜的超导TES探测器, 像元数为6848^[53]。

在大规模超导KID探测器天文应用方面, IRAM的30 m望远镜NIKA2相机采用了2896像元超导KID探测器, 实现了150/260 GHz双频段协同观测, 并实现了260 GHz频段双极化观测^[54]。荷兰SRON研制的A-MKID像机包含了2.5万像元的Al/NbTiN混合超导KID探测器, 工作在350/850 GHz频段, 计划应用于APEX(Atacama Pathfinder Experiment)望远镜。此外, 一批在建与计划中的大型望远镜均将采用基于超导KID探测器的像机。例如, 墨西哥LMT(Large Millimeter Telescope)望远镜配置了MUSCAT和TOITEC大规模超导KID探测器^[55], 前者包含1600像元260 GHz频段超导KID探测器, 后者则拓展到150/220/280 GHz三个频段, 并且具有偏振观测能力, 探测器像元数接近7000。正在建设的CCAT-P望远镜将配备Prime-Cam终端, 包含7个

模块,其中850 GHz模块将采用4万像元的超导KID探测器,由10片布局了4000像元的超导KID探测器的芯片(每片芯片150 mm直径)拼接而成^[56]。此外,高空太赫兹气球观测计划BLAST-TNG(The Balloon-borne Large Aperture Submillimeter Telescope)摆脱了地球大气的影响,将在600/850/1200 GHz三个频段采用像元数超过3000的超导KID探测器。规划中的AtLAST(Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope)50 m口径望远镜具有大视场和高通量的优势^[57],计划配备大规模多色超导成像探测器等。国内方面,中国科学院紫金山天文台研制的超导KID探测器计划应用于正在推动的南极昆仑站天文台太赫兹望远镜以及青藏高原亚毫米波望远镜。

4 超导探测器与宽带成像光谱仪

大规模成像探测器配合二维光谱仪的中低分辨率($\lambda/\Delta\lambda = 100-1000$)宽带成像光谱仪,能够为宇宙早期大尺度结构观测、天体物理化学性质诊断以及天体红移精确测定等提供独特技术手段。得益于JCMT望远镜SCUBA-2巡天观测和空间天文台Herschel的空间观测等,越来越多的太赫兹/亚毫米波星系被发现。针对太赫兹连续谱辐射的宽带光谱观测,确定星系光谱能量分布特性(spectral energy distribution, SED),将有助于研究目标星系辐射光度和质量函数等特性。另外,宇宙学距离上天体红移的精确测定一直是个难题,尤其是随着越来越多太赫兹/亚毫米波星系的发现,亟需对这类天体的红移做出快速精确测定。但是,此类天体光学不可见,观测手段之一就是采用太赫兹宽带光谱探测技术,同时探测这类天体中同一分子(如CO分子)的多阶转动跃迁谱线来精确确定红移。太赫兹宽带光谱探测在观测多谱线的同时,其超宽带本领(几百GHz)可以同时获得连续谱总功率信息,也有助于研究目标天体的物理性质。

传统的太赫兹宽带光谱探测设备,如应用于空间天文台Herschel的SPIRE(the Spectral and

Photometric Imaging REceiver)仪器,主要是采用二维半导体探测器阵列与傅里叶光谱仪(FTS)技术。SPIRE-FTS包括了一台双波段、光谱分辨率($\lambda/\Delta\lambda$)为40—1000、能够覆盖短波段191—318 μm 和长波段294—671 μm 的傅里叶光谱仪。其中低频段(长波段)和高频段(短波段)分别使用19像元和37像元的半导体(锗基)阵列探测器,其工作温度为300 mK,灵敏度达到 10^{-17} W/Hz^{1/2}。此外,SPIRE-FTS在最大光程差模式下能够实现 0.04 cm^{-1} (1.2 GHz)的光谱分辨率,而在标准模式下光谱分辨率为 0.83 cm^{-1} (25 GHz)。SPIRE-FTS由于采用经典光谱技术(即傅里叶光谱),典型缺点就是光程过长,导致系统较为庞大和复杂。如果希望将此类仪器发展成三维成像光谱(即二维空间与一维光谱同时复用),系统就更为复杂。

20世纪70、80年代,有一种流行的射电天文光谱仪,称为Filter Bank,即工作于不同微波频率,但带宽相同的滤波器阵列。借鉴Filter Bank的概念,欧美等超导探测器研究组提出了基于超导KID探测器的单片集成成像光谱探测器,如SuperSpec^[58]和DESHIMA^[59]。超导成像光谱探测器是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。实现这一新型成像光谱探测器的核心是:具有低损耗、高选择度的太赫兹超导带通滤波器及易于频分复用和具有高灵敏度的超导KID探测器。由于采用单一芯片的同一超导工艺制备,易实现多像元(空间复用)集成频谱仪芯片。目前,基于超导KID探测器的单片集成太赫兹成像光谱探测器仍处于起步阶段,但在国际上已得到广泛关注,有望成为一种革命性的太赫兹成像光谱技术。近期,中国科学院紫金山天文台也开展了基于超导KID探测器的单片集成成像光谱探测器技术研究。

5 结语

总体上,高灵敏度超导探测器是目前太赫兹天文高分辨率光谱观测和大规模阵列成像观测的首选,在宇宙学和天体物理、化学、生物等领域正发挥越来越重要的作用。针对未来太赫兹天文

应用需求, 超导探测器技术仍需进一步突破。在太赫兹超导 SIS 混频器和超导 HEB 混频器技术方面, 未来发展趋势主要是灵敏度和射频、中频带宽的持续改善、与本振信号源及低温制冷低噪声放大器的集成以及百像元规模的多波束超导混频接收机集成技术(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、模块化集成技术)等。在太赫兹超导 TES 探测器和超导 KID 探测器技术方面, 未来发展趋势主要是探测灵敏度

和像素规模的持续提高以及器件设计制备技术与低噪声读出复用技术的持续进步, 十万级像元的高灵敏度超导成像探测器将是未来主要研究方向。另外, 超导探测器在工作频段方面将有望拓展至光学红外频段, 而在应用方面将会逐步拓展至大气科学、量子信息、基础物理等其他领域。

致谢 感谢张文和李婧两位老师在文章撰写过程中提供的帮助。

参考文献

- [1] Phillips T G, Keene J. Proceedings of the IEEE, 1992, 80: 1662
- [2] Zmuidzinas J, Richards P L. Proceedings of the IEEE, 2004, 92: 1597
- [3] Walker C K. Terahertz Astronomy. 1st edition. CRC Press, 2020
- [4] Hughes D H, Serjeant S, Dunlop J *et al.* Nature, 1998, 394: 241
- [5] Brogan C L, Pérez L M, Hunter T R *et al.* The Astrophysical Journal Letters, 2015, 808: L3
- [6] Hashimoto T, Laporte N, Mawatari K *et al.* Nature, 2018, 557: 392
- [7] Akiyama K, Alberdi A, Alef W *et al.* The Astrophysical Journal Letters, 2019, 875: L1
- [8] Hartogh P, Lis D C, Bockelée-Morvan D *et al.* Nature, 2011, 478: 218
- [9] Gusten R, Wiesemeyer H, Neufeld D *et al.* Nature, 2019, 568: 357
- [10] Tucker J R, Feldman M J. Rev. Mod. Phys., 1985, 57: 1055
- [11] Gershenzon E M, Goltsman G N, Gogidze I G *et al.* Soviet Physics Superconductivity, 1990, 3: 1582
- [12] Irwin K D, Hilton C G. Transition-edge Sensors, Cryogenic Particle Detection. Berlin: Springer, 2005. pp. 63—150
- [13] Day P, LeDuc H, Mazin B *et al.* Nature, 2003, 425: 817
- [14] Josephson B D. Phys. Lett., 1962, 1: 251
- [15] Giaever I, Megerle K. Phys. Rev., 1961, 122: 1101
- [16] Gurvitch M, Washington M A, Huggins H A. Appl. Phys. Lett., 1983, 42: 472
- [17] Uzawa Y, Fujii Y, Gonzalez A *et al.* Physics C: Superconductivity and its Applications, 2013, 494: 189
- [18] Jackson B D, Lange G, Zijlstra T *et al.* IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2006, 54: 547
- [19] Karpov A, Miller D, Rice F *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17: 343
- [20] Li J, Takeda M, Wang Z *et al.* Appl. Phys. Lett., 2008, 92: 222504
- [21] Kawamura J, Chen J, Miller D *et al.* Appl. Phys. Lett., 1999, 75: 4013
- [22] Zhang W, Khosropanah P, Gao J R *et al.* J. Appl. Phys., 2010, 108: 093102
- [23] Zhang W, Khosropanah P, Gao J R *et al.* Appl. Phys. Lett., 2010, 96: 111113
- [24] Zhang W, Li N, Jiang L *et al.* Chin. Phys. Lett., 2007, 24: 1778
- [25] Floet D W, Miedema E, Klapwijk T M *et al.* Appl. Phys. Lett., 1999, 74: 433
- [26] Miao W, Zhang W, Zhong J Q *et al.* Appl. Phys. Lett., 2014, 104: 052605
- [27] Miao W, Li F M, Gao H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2021, 118: 112602
- [28] Miao W, Zhang W, Zhou K M *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27: 2200304
- [29] Zhou K M, Miao W, Lou Z *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25: 2300805
- [30] Ren Y, Zhang D X, Zhou K M *et al.* AIP Advances, 2019, 9: 075307
- [31] Ren Y, Zhang D X, Wang Z *et al.* Appl. Phys. Lett., 2020, 116: 131108
- [32] Ren Y, Hovenier J N, Higgins R *et al.* Appl. Phys. Lett., 2011, 98: 231109
- [33] Ren Y, Hovenier J N, Cui M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2012, 100: 041111
- [34] Ren Y, Hayton D J, Hovenier J N *et al.* Appl. Phys. Lett., 2012, 101: 101111
- [35] Miao W, Lou Z, Xu G Y *et al.* Optics Express, 2015, 23: 4453
- [36] Miao W, Gao H, Lou Z *et al.* IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8: 581
- [37] Tsukagoshi T, Muto T, Nomura H *et al.* The Astrophysical Journal Letters, 2019, 878: L8
- [38] Silva J R G, Mirzaei B, Laauwen W *et al.* 4×2 HEB Receiver at 4.7 THz for GUSTO. Proceedings of the SPIE, 2018
- [39] Siles J V, Pineda J, Kawamura J H *et al.* ASTHRO: The Astrophysics Stratospheric Telescope for High Spectral Resolution Observations at Submillimeter-wavelengths. Proceedings of the SPIE, 2020
- [40] Lita A E, Rosenberg D, Nam S *et al.* IEEE Trans. Appl. Super-

- cond., 2005, 15: 3528
- [41] Martinis J M, Hilton G C, Irwin K D *et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2000, 444: 23
- [42] Crauste O, Marrache-Kikuchi C A, Berge L *et al.* J. Low Temp. Phys., 2011, 163: 60
- [43] Hijmering R A, Khosropanah P, Ridder M *et al.* J. Low Temp. Phys., 2012, 167: 242
- [44] Zhang W, Miao W, Wang Z *et al.* J. Low Temp. Phys., 2018, 193: 276
- [45] Ullom J N, Bennett D A. Supercond. Scv. Technol., 2015, 28: 084003
- [46] Mazin B A. Microwave Kinetic Inductance Detectors. California Institute of Technology, 2004
- [47] Baselmans J J A, Bueno J, Yates S J C *et al.* Astronomy & Astrophysics, 2017, 601: A89
- [48] Shi Q, Li J, Zhi Q *et al.* Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2022, 65: 239511
- [49] Holland W S, Bintley D, Chapin E L *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 430: 2513
- [50] Bleem L, Ade, P, Aird K *et al.* J. Low Temp. Phys., 2012, 167: 859
- [51] Thornton R J, Ade P A R, Aiola S *et al.* Astrophysical Journal, Supplemental Series, 2016, 227: 2
- [52] <https://cmb-s4.org>
- [53] Salatino M, Austermann J, Meinke J *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31: 2102305
- [54] Adam R, Adane A, Ade P A R *et al.* Astronomy & Astrophysics, 2018, 609: A115
- [55] Ulbricht G, De Lucia M, Baldwin E. Applied Sciences, 2021, 11: 2671
- [56] Chapman S C, Huber A I, Sinclair A K *et al.* The 850 GHz Camera for Prime-Cam on FYST. Proceedings of the SPIE, 2022
- [57] Ramasawmy J, Klaassen P D, Cicone C *et al.* The Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope: Key Science Drivers, Proceedings of the SPIE, 2022
- [58] Barry P S, Shirokoff E, Kovacs A *et al.* Electromagnetic Design for Superspec: a Lithographically-patterned Millimeterwave Spectrograph, In: SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation, 2012, 84522F
- [59] Endo A, van der Werf P, Janssen R M J *et al.* J. Low Temp. Phys., 2012, 167: 341



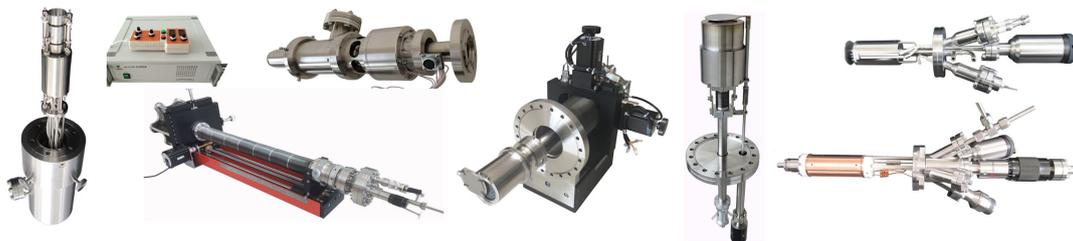
大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理 and 薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

