

文章编号: 2095-4980(2017)03-0354-04

基于高温超导约瑟夫森结的小型频谱检测仪

许颖超, 许伟伟*, 郁梅, 陈健, 金飏兵, 康琳, 吴培亨

(南京大学 电子科学与工程学院 超导电子学研究所, 江苏 南京 210093)

摘要: 为实现对太赫兹信号的频谱测量, 以集成对数周期天线的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO)约瑟夫森双晶结为信号探测器, 开展了基于高温超导约瑟夫森结的小型频谱检测仪的研制。在低温环境下, 通过THz信号耦合、信号测量、数据读取及LabVIEW控制界面等功能模块, 利用Hilbert逆变换完成信号的频谱恢复, 最终成功研制出高温超导约瑟夫森结频谱检测仪, 并对其进行了基本性能测试, 实现了对0.1~2.5 THz的信号检测, 频率分辨率高达0.04 GHz(@114 GHz)和2 GHz(@1.78 THz)。此外, 对其分辨率的影响因素进行了初步分析。

关键词: 太赫兹; 高温超导; Hilbert变换; 频谱仪

中图分类号: TN773

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201703.0354

Small terahertz spectrometer based on high temperature superconducting Josephson junction

XU Yingchao, XU Weiwei*, YU Mei, CHEN Jian, JIN Biaobing, KANG Lin, WU Peiheng

(Research Institute of Superconducting Electronics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Terahertz(THz) wave is the last comprehensive research and development wave band of the electromagnetic spectrum. In order to achieve the terahertz signal spectrum measurement, a study of THz spectrometer based on high temperature superconducting Josephson junctions(JJS) is launched. The $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) bi-crystal Josephson junctions with log-periodic antennas are utilized as detectors. Under the low temperature, by using the signal measuring system, data acquisition and LabVIEW control interface, etc., the THz spectrometer based on high temperature superconducting JJS is finally realized and reaches the measurement of the frequency range from 0.1 THz to 2.5 THz. The frequency resolution reaches 0.04 GHz (@114 GHz) and 2 GHz(@1.78 THz). The influence factors of resolution are preliminarily analyzed.

Keywords: terahertz; high temperature superconducting; Hilbert transformation; spectrometer

太赫兹(THz)波是电磁波谱中最后一个有待进行全面研究开发的波段, 具有很高的科学研究价值和重大研究意义。近年来, 太赫波源和太赫兹波探测取得的一系列进展, 极大地促进了 THz 波的发展和應用。超导约瑟夫森结是公认的最灵敏的 THz 检测器之一, 具有变频效率高, 灵敏度高, 工作频带宽, 噪声系数低等优点^[1-2]。目前 THz 探测技术仍然受到辐射源功率偏低的因素限制, 研制高灵敏度的 THz 频谱仪是在科学研究中不可缺少的。为了实现对太赫兹信号的频谱测量, 以约瑟夫森双晶结为信号探测器, 开展了基于高温超导约瑟夫森结的小型频谱检测仪的研究。

1 理论分析

由于外差式检测保留了射频信号的幅度和相位信息^[3], 利用约瑟夫森效应便可实现对 THz 辐射信号的频谱检测。假设入射到约瑟夫森结上的 THz 信号的频谱为 $S(f)$, 有无 THz 辐射时结 $I-U$ 特性的响应变化为 $H(U)$, 根

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2016-11-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB339804); 国家自然科学基金资助项目(61371036 和 61571219); 江苏省青年基金资助项目(BK20131032)

*通信作者: 许伟伟 email:wwxu@nju.edu.cn

据 RSJ 电路模型理论^[4]可推导出电流响应 $\Delta I(U)$, 代入公式 $H(U) = \frac{8Q_0 I(U) \Delta I(U)}{\pi I_c^2 R_n^2}$ (其中 I_c 为结临界电流, R_n 为正常态电阻), 得到 $H(U)$, 由于 $H(U)$ 与 $S(f)$ 的 Hilbert 变换成正比, 那么进行 Hilbert 逆变换便可推算出入射信号频谱 $S(f)$ ^[5-6]。

频谱线宽(Δf)是频谱仪的一个重要性能参数, 直接影响了频谱仪的分辨力, 由仪器测量带宽(ΔU)与约瑟夫森线宽(δf)组成, 满足公式, 其中仪器测量带宽主要由仪器系统的固有噪声引起的噪声电压和电压测量精确度来决定。约瑟夫森线宽目前无法直接被测量, 将结的特性参数值代入公式进行数值计算得到约瑟夫森线宽值, 并分析了正常态电阻 R_n 、噪声温度 T_n 及偏置电流 I_b 对约瑟夫森线宽的影响。

2 双晶结制备和系统模型

采用长有 YBCO 超导薄膜的 MgO 双晶基片, 晶界夹角为 24° , 通过一系列工艺成功制备出了性能稳定的 $1 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 大小的约瑟夫森双晶结, 见图 1。并在样品表面集成平面对数周期正弦天线来增强结与信号的耦合能力^[5-7], 天线的频带带宽约为 20 GHz~2.3 THz, 回波损耗约为 $-5 \sim -30 \text{ dBm}$ 。系统框图见图 2, 采用液氮杜瓦或 GM 制冷机获得 5 K 的低温环境, 利用 2 个离轴抛物面反射镜及硅透镜集成准光学系统^[5-8]。利用 USB-6281 型数据采集卡控制电流源输出扫描电流, 读取经低噪声放大器放大后的结两端电压, 绘制出约瑟夫森结的 $I-U$ 曲线, 将调制过的 THz 信号辐射到结上, 扫描结电流并提取结电压中与调制频率相同的信号的幅值, 便可得到结的电压响应 $\Delta U(U)$, 通过一系列理论分析及推算便可得到入射信号频谱 $S(f)$ 。

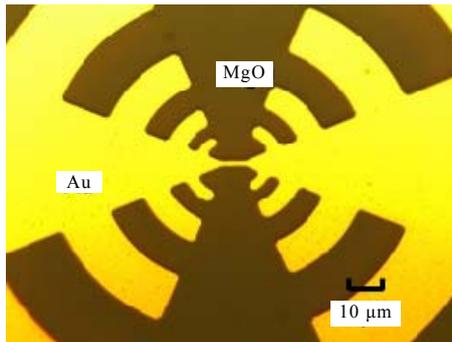


Fig.1 Argon-ion etching image of the YBCO bi-crystal JJS
图 1 氩离子刻蚀后的 YBCO 约瑟夫森双晶结

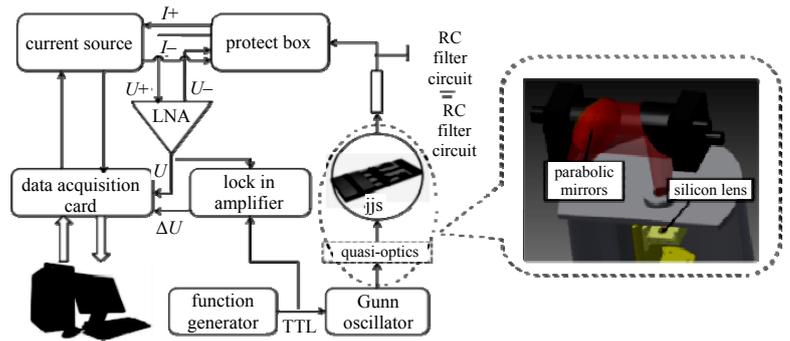


Fig.2 Signal measurement system of THz spectrometer
图 2 THz 频谱仪的系统框图

3 结果与讨论

完成了在 HDL5 型液氮杜瓦上的小型超导太赫兹频谱检测仪系统(长×宽×高为: 700 mm×500 mm×560 mm), 见图 3。为了验证其性能, 利用实验室现有的太赫兹源, 实现了对 0.1~2.5 THz 的信号检测。利用耿氏振荡源对结辐射 0.1 THz 的信号, 检测到频谱 3 dB 线宽为 $\Delta f=0.04 \text{ GHz}$, 分辨率 $\Delta f/f=0.04\%$, 见图 4(a)。利用远红外激光器同时对结辐射 1.8 THz 和 2.5 THz 的信号, 检测到频谱 1.78 THz 的信号的 3 dB 线宽为 $\Delta f=2 \text{ GHz}$, 分辨率 $\Delta f/f=0.11\%$, 见图 4(b), 其中, 0.89 THz 频率辐射是由于 2.5 THz 和 1.8 THz 之间的差频而得。

频谱线宽主要由仪器本身的测量带宽和约瑟夫森线宽组成。测量带宽由系统固有噪声电压和电压测量精确度决定。在电压满量程 $\pm 10 \text{ V}$ 时, 电压的采集精确度在 $1 \mu\text{V}$ 以内, 降低采集卡量程后, 电压精确度接近于系统噪声电压。在零电压偏置的情况下, 电压漂移 $< 6 \times 10^{-7} \text{ V}$, 电流漂移 $< 1 \times 10^{-7} \text{ A}$, 根据公式可知仪器测量带宽 $< 0.5 \text{ GHz}$ 。

$$\delta_f = \frac{4\pi k_B T_n R_n}{\phi_0} \left[1 + \left(\frac{f_c}{f_s} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{I_c^2}{I_b^2} \right) \right] \quad (1)$$

约瑟夫森线宽是直接影响频谱仪的分辨率的重要参数之一, 由式(1)可知, 它与结的性能参数(噪声温度 T_n , 正常态电阻 R_n , 偏置电流 I_b)密切相关, 其中



Fig.3 Physical diagram of the system
图 3 系统实物图

$f_c = I_c R_n / I_0$ 为特征频率, f_s 为辐射信号的频率。由于约瑟夫森线宽无法从测量中直接得到, 将结的性能参数值代入进行数值计算得到约瑟夫森线宽, 并与实际测量的频谱图作比较。

计算了在不同参数条件下约瑟夫森线宽 δ_f 与测量频率的关系曲线。图 5(a) 表明约瑟夫森线宽 δ_f 随着噪声温度 T_n 越低而越小, 当 $I_b = I_c$ 时, δ_f 达到最大值, 其中 $R_n I_c = 2.3 \text{ mV}$, $R_n = 1 \Omega$ 。图 5(b)、图 5(c) 显示了正常态电阻 R_n 对约瑟夫森线宽 δ_f 的影响, R_n 越小, 同时特征电压 ($I_c R_n$) 越小, δ_f 将变得越小, 而且特征电压越小, 低频端的变化越平缓, 当 $I_b = I_c$ 时, δ_f 达到最大值, 其中 $T_n = 10 \text{ K}$, 图 5(b) 中 $R_n I_c = 2.3 \text{ mV}$, 图 5(c) 中 $R_n I_c = 0.1 \text{ mV}$ 。图 5(d) 表明约瑟夫森线宽 δ_f 随着偏置电流 I_b 越小反而越大, 其中 $I_c = 423 \mu\text{A}$, $R_n = 5.8 \Omega$, $T_n = 5 \text{ K}$, 实验测量 1.8 THz 时带宽为 2 GHz , 与计算得出 5 K 时带宽为 1.8 GHz 的数据相当, 因此可推断用工作环境温度代替检测器噪声温度代入计算是合理的。

4 结论

通过希尔伯特变换最终建立了基于高温超导约瑟夫森结的小型频谱检测仪, 实现了 $0.1 \sim 2.5 \text{ THz}$ 的宽频带频谱测量, 并对频谱仪分辨率的影响因素(频谱线宽)做了初步分析。频谱线宽主要由仪器测量带宽与约瑟夫森线宽组成, 测量带宽由仪器的噪声电压和电压测量精确度所决定, 约瑟夫森线宽由结的性能决定。噪声温度越低, 约瑟夫森线宽越小。偏置电流越小, 约瑟夫森线宽越大。正常态电阻越小, 同时特征电压越小, 约瑟夫森线宽越小, 而且低频端的变化越平缓, 这与提高检测器灵敏度的需求相违背, 因此, 针对不同需求合理选择不同性能参数的约瑟夫森结是非常必要的。

参考文献:

- [1] SIZOV F, GALSKI A. THz detectors[J]. Progress in Quantum Electronics, 2010, 34(5): 278-347.
- [2] CHEN J, HORIGUCHI H, WANG H B, et al. Terahertz frequency metrology based on high-Tc Josephson junctions[J]. Superconductor Science and Technology, 2002, 15(12): 1680-1684.
- [3] WU Jingbo, DAI Hao, WANG Hao, et al. Extraordinary terahertz transmission in superconducting subwavelength hole array[J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1101-1106.
- [4] OLEG Y Volkov, YURIY Divin, VLADIMIR N Gubankov, et al. Terahertz characterization of external resonant systems by high-Tc Josephson junctions[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 306-310.
- [5] YURIY Divin, ALEXANDER Snezhko, MATVEY Lyatti, et al. Terahertz applications of hilbert-transform spectral analysis[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(4): 1500807.
- [6] YURIY Divin, MATVEY Lyatti, ALEXANDER Snezhko, et al. THz hilbert-transform spectrum analyzer based on high-Tc Josephson junction in stirling cryocooler[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 1800204.

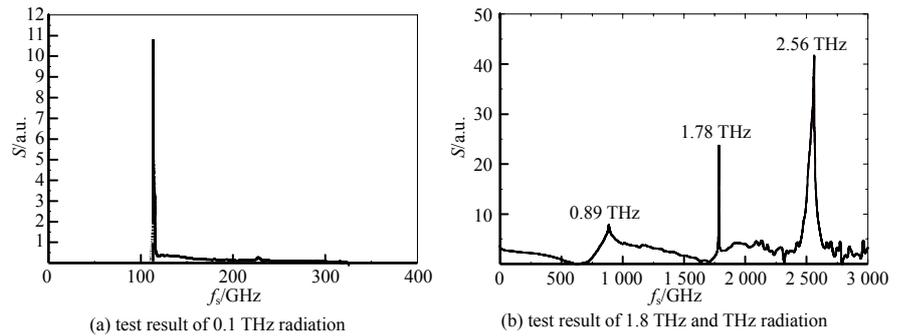


Fig.4 Results of THz spectrometer

图4 频谱测量结果

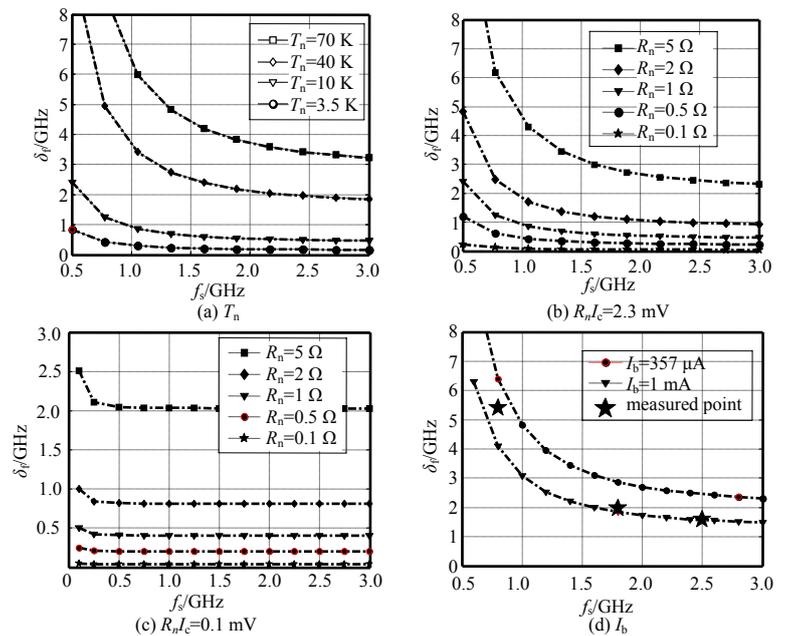


Fig.5 Influence of the different T_n , R_n , and I_b on the line width

图5 不同的 T_n , R_n 和 I_b 分别对约瑟夫森线宽的影响

- [7] AN D Y, YUAN J, KINEV N, et al. Terahertz emission and detection both based on high-Tc superconductors: towards an integrated receiver[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(9): 11-13.
- [8] GREGOR Klatt, RAPHAEL Gebbs, HANJO Schäfer, et al. High-Resolution terahertz spectrometer[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(1): 159-168.

作者简介:



许颖超(1989-),女,河南省南阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹检测.email:yhxu1113@163.com.

许伟伟(1954-),女,南京市人,教授,博士生导师,主要研究方向为新型超导电子学器件、亚毫米波段高灵敏检测、微波测量技术.email:wwxu@nju.edu.cn.

郁梅(1987-),女,江苏省南通市人,博士,主要研究方向为天线设计、微波测量技术.

陈健(1963-),男,江苏省启东市人,教授,博士生导师,主要研究方向超导电子器件及其物性、超导量子信息技术、太赫兹技术及其应用.

金飏兵(1967-),男,南京市人,教授,博士生导师,主要研究方向为低温太赫兹光谱技术、太赫兹检测、超导薄膜的微波和太赫兹表征.

康琳(1961-),女,南京市人,教授,硕士生导师,主要研究方向为超导电子学、微加工技术.

吴培亨(1939-),男,江苏省张家港市人,院士,博士生导师,主要研究方向为超导电子学、新型超导电子学器件、微波测量技术.



OSEC 2017 首届“兵器工程大会”会议暨征文通知(第一轮)

The 1st Ordnance science and Engineering Conference (OSEC 2017)

兵器工程是一门极具交叉性的工程技术学科,其涉及武器系统与工程,武器发射工程,探测制导与控制技术,弹药工程与爆炸技术,特种能源技术与工程,装甲车辆工程,信息对抗技术。随着机械、电子、光学、计算机、自动控制、空气动力学、高温高压流体力学、材料学等学科的发展,不断充实和发展了兵器科学的研究方向,提升了兵器工程的技术水平,拓宽了兵器工程的应用领域。特别是高新技术的现有成果在兵器工程上的集成,兵器装备与工程应用已经广泛涉及人工智能、网络信息、动力与能源、近代力学、机械设计与制造、材料与化学、信息光学、近现代物理等学科的基础理论、技术和方法,并与控制工程、计算机技术、车辆工程、船舶工程、航空航天工程、电子与通信技术、光学技术等工程领域密切相关。为了更好地引导和推动我国兵器科学与工程的前沿研究及融合发展,为从事相关领域研究的专家、学者和工程师提供交流平台,拟于**2017年10月**在重庆召开首届“兵器工程大会”。

大会主题: 汇聚交叉与前沿, 推动融合与创新, 促进兵器学科发展。大会设主论坛“学科交叉与军民融合”,根据论文投稿情况设若干专题进行研讨。如“光机电融合与对抗”专题,“先进动力与推进”专题,“智能制造与装备”专题,“轻武器设计与制造前沿”专题等。大会将邀请国内外相关领域的权威专家作主题报告和专题报告,以及优秀论文交流。大会具体内容和征稿具体要求参见 <http://scbg.qks.cqut.edu.cn/>或 www.iaeej.com, 投稿方式(参会注册)见 <http://bqgcdh.meeting.cos.org.cn>, 征文截止时间: **2017年9月15日**。

大会联系方式:

《兵器装备工程学报》编辑部

地址:重庆市巴南区红光大道69号重庆理工大学明德楼6楼614室

电话:023-68852703 唐定国、023-62569336 周江川

中国兵工学会

地址:北京市海淀区车道沟10号院中国兵工学会学术与组织管理部

电话:15201643738、010-68963055、010-68962962(传真)葛萌

邮编:400054

邮箱:bqzbgcxb@126.com

邮编:100089

中国兵工学会

2017-3-8