

清华大学物理系超导电子学实验室



清华大学物理系超导电子学实验室合影

项目, 发表学术论文 210 多篇, 获得了超导滤波器和低温低噪声放大器设计研制相关的授权发明专利 14 项。其中超导滤波系统已在多个无线通信领域获得广泛应用。实验室已建成先进的超导材料制备和测试平台、超导微波器件设计研制平台, 具备了从超导材料制备、超导微波器件设计、制备、测试、集成的完整能力。

清华大学物理系超导电子学实验室在超导物理和超导微波器件方面进行了 20 多年的研究工作, 在超导材料技术、微波电磁场技术、器件制备工艺和无线通信技术等方面开展了深入的研究, 在实验室负责人曹必松教授的带领下, 研究团队在超导微波器件的理论研究、器件制备、系统集成和工程应用等方面已取得多项重要成果。在超导滤波技术领域获得国家技术发明二等奖、中国高等学校十大科技进展、教育部技术发明一等奖、原信息产业部信息产业重大技术发明(十项之一)等多项国家级和省部级奖励。

实验室先后承担了国家自然科学基金委项目、863 重大项目、专项项目、省部级重点项目等 10 多项研究

1 高温超导滤波系统

高温超导材料是 20 世纪基础研究最重要的科学发现之一, 在信息、输电、电机、交通运输、微电子和电子计算机、医疗、军事等领域均具有重要的应用价值和广泛的应用前景。世界各国都掀起了研究高温超导材料的热潮, 采用各种材料体系(如 YBCO、TBCCO、BSCCO、HBCCO 等体系)所制备的超导薄膜、超导线材、超导块材等高温超导材料都逐步研制成功了应用器件并进行了应用演示。

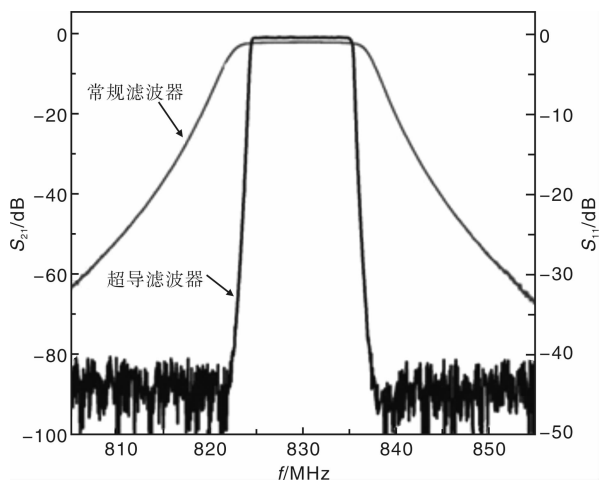
钇钡铜氧 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 高温超导材料的临界转变温度为 90 ~ 92 K。在所有高温超导材料中结构单一, 易于获得结晶良好的单相薄膜, 临界电流密度超过 10^6 A/cm^2 。将数百纳米的高温超导薄膜外延生长在损耗极低的单晶介质基片上, 就可以得到高质量的高温超导薄膜材料。在 16 GHz 以下的微波频段,



超导实验室研究人员进行超导器件制备工作

YBCO 高温超导薄膜材料的表面电阻比 77 K 低温下的金属铜还要低 2 ~ 4 个数量级, 具有优异的微波表面阻抗特性。

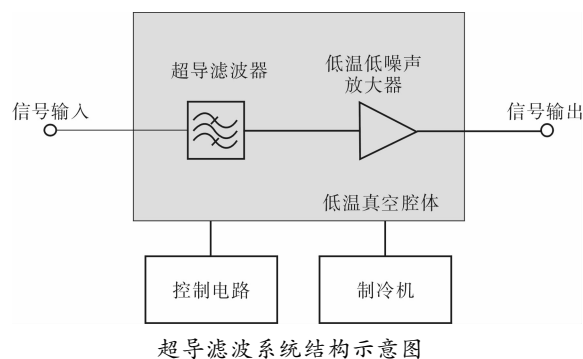
用高温超导材料制作的微波器件损耗极小, 在高 Q 值微波谐振器、高性能滤波器、延迟线等微波器件的研制方面拥有巨大的优势, 在军用和民用领域均具有广阔的应用前景。比如, 用高温超导薄膜可以制备出高节数的、具有高带边陡峭度和高带外抑制特性的滤波器, 而其插入损耗可以保持非常小, 具有常规滤波器无法比拟的、近于理想的滤波特性。左图是常规腔体滤波器和本项目组研制的高温超导滤波器的实测性能比较。超导滤波器的插损小于 0.2 dB, 显著低于常规滤波器; 带边陡峭度为 50 dB/MHz, 比常规滤波器提高了 1 个数量级; 带外抑制制度在距带边 2 MHz 处达到 90 dB, 比常规滤波器提高数个量级。在移动通信、无线探测等领域的应用获得了显著效果。高温超导材料和超导滤波器已被《国



超导滤波器与常规滤波器比较

家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)》和《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》(2013年度)列为明确支持的重要技术之一。

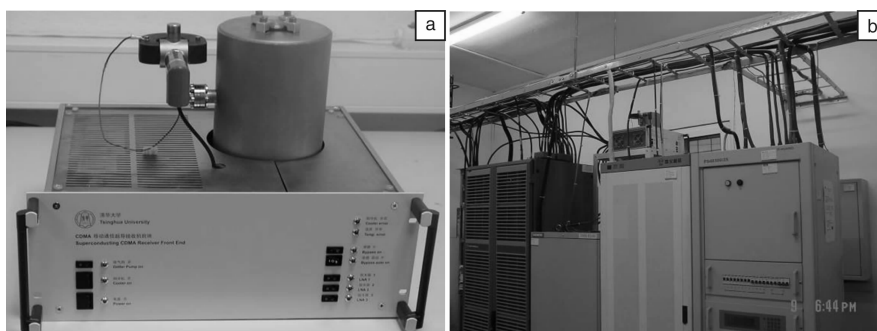
超导材料必须在超导转变温度下才具有零电阻特性,实际应用的超导滤波系统通常由超导滤波器、低温低噪声放大器、真空腔体、制冷机和控制电路等部分组成。利用小型制冷机,无需液氮或液氦等冷却介质,就可以将超导滤波器和低温低噪声放大器等核心器件的工作温度降至约零下200℃,为超导滤波器提供低温工作环境。真空腔体为超导滤波器和低温低噪声放大器等核心器件提供一个真空保护环境。由于超导滤波器具有近于理想的滤波特性,并且低噪声放大器在低温工作环境下噪声系数进一步降低,因此超导滤波系统同时具有极低的噪声系数和非常高的频率选择性,应用于各种



无线通信和探测装备的接收机前端,可同时大幅度地提高灵敏度和抗带外干扰能力,大幅增强无线通信和探测装备在复杂电磁环境下的性能,在移动通信(2G, 3G, 4G)、国防(雷达、集群通信、制导、电子战装备)和射电天文、深空探测重大科技基础设施等领域均具有极为重要的应用价值。实际应用证明,移动通信基站使用超导滤波系统后的优越性包括:①增加基站容量。由于滤波器滤波选择性好,接收灵敏度高,基站可以同时服务更多的用户;②扩大覆盖面积。由于超导滤波系统噪声系数低,基站灵敏度显著提高,从而扩大覆盖范围;③提高抗干扰能力。由于超导滤波器带外抑制强,可有效抑制带外干扰性能;④改善通话质量。包括降低掉话率和误码率等;⑤降低手机发射功率。由于系统灵敏度的提升,使得手机终端的发射功率可降低50%以上,不但使系统能耗降低,符合节能和环保的要求,更降低了电磁辐射对人体可能造成的影响。

2 高温超导滤波技术的推广普及和工程化应用

实验室除完成高温超导的物理性能、超导微波器件的基础研究外,还在工程化应用方面,取得了系统的、开创性的、有全局影响和广泛应用前景的研究成果,研究成果经鉴定达到世界先进水平,并实现了高温超导自1986年被发现后在我国的首次规模商业应用:2001年10月,研制成功我国GSM1800移动通信用高温超导滤波系统;2002年5月研制的GSM1800移动通信用超导滤波系统通过了专家鉴定会技术鉴定,鉴定委员会确认:“超导滤波器和超导滤波系统的性能指标达到国际超导滤波器的先进水平,并处于国内领先水平”;2003年4月,研制成功我国CDMA移动通信用超导滤波系统;2004年3月,所研制的高温超导滤波系统在中国联通唐山分公司的CDMA移动通信基站现场通信试验成功,并投入长期使用,覆盖面积数10平方公里,每天24h为用户服务。中国联通的测试报告指出,改用超导滤波系统后,通信系统关键技术指标——手机发射功率降低50%,基站的接收灵敏度、覆盖范围、通话质量和通信容量大幅提高。该项工作表明,继美国之后,我国已经成为世界上第二个靠自己的技术实现高温超导在移动通信中应用的国家。



(a)用于唐山联通CDMA移动通信基站的超导滤波系统, (b)超导滤波系统在唐山联通基站长期运行

2005年12月,在北京繁华的大钟寺地区建成了高温超导移动通信应用示范小区,小区包括了中国联通的5个CDMA移动通信基站,使用30路超导滤波系统,覆盖10多万居民,每天24h为用户提供优质服务,连续使用3年

多,使通信性能大幅提高,实现了我国超导滤波系统的批量长期应用。



联想桥站

皂君庙站

知春里站



西五道口站

首都体育学院站铁塔

首都体育学院站

高温超导滤波系统应用示范基地各基站运行

2010年4月,青海玉树地震灾区承担救援飞机引导和保障任务的探测设备遇到了严重的干扰问题,影响对救灾飞机的正常观测,亟需提高抗干扰能力,实验室在短时间内研制了一台新型的、适合于该探测设备的超导滤波系统,运抵玉树海拔4500米的临时站点,在严重高原反应和寒冷环境下,加装了超导滤波系统后的探测设备,其抗干扰能力大幅提高,干扰被抑制,探测目标清晰。

3 2012 年超导滤波系统产品实现规模商业应用

为实现超导滤波系统在我国规模化商业应用,实验室联合综艺超导科技有限公司攻克了高性能超导滤波器和低温低噪声放大器设计制备技术、多通道超导滤波器性能一致性研制技术、满足装备苛刻使用要求的环境适应性技术和超导滤波系统集成技术等一系列技术难题,于2009年12月完成了超导滤波系统产品样机的研制。2010年1月至11月,由7个专业测试单位对超导滤波系统产品进行了包括电性能测试,满足通信装备高低温、冲击、振动、低气压、盐雾、霉菌、湿热等苛刻使用环境适应性试验,通信装备加装超导滤波系统前后的性能对比试验和用户长期试用等全面性能测试。

试验结果表明,超导滤波系统的全部性能均达到或超过了通信装备实际应用的技术要求。超导滤波系统使重度干扰下原本无法工作的通信装备恢复了正常工作;使中度干扰下通讯装备的最大作用距离比原装备平均增加了56%。自2010年10月起,超导滤波系统在该型号通信装备上投入长期运行,至今已连续无故障运行2年以上。2011年1月超导滤波系统通过了国家技术鉴定,获得了在我国通信装备实际应用的许可。同年8月,获得了首批5种型号超导滤波系统产品的订货合同,在全国10多个省市推广。2012年10月22日,在清华大学召开“高温超导滤波技术成果鉴定会”,我国自主研发、拥有完全自主知识产权的高温超导滤波系统首批产品订货完成生产并交付用户使用,在全国16个省市区的通信装备上投入长期实际应用。这是我国高温超导应用研究的重大突破,标志着我国高温超导在通信领域已进入规模商业应用和产业化阶段。鉴定意见指出,项目总体技术达到国际先进水平,为采用高温超导技术提高通信装备的抗带外干扰性能和电磁兼容性奠定了坚实的技术基础,为我国通信现代化作出了重大贡献。

(清华大学 魏斌供稿)