

# 上海师范大学

## 硕士学位论文

太赫兹超导隧道结混频器特性研究

学    院：        数    理    学    院    

专    业：        天    体    物    理    

研究方向：        天    文    技    术    与    方    法    

研究生姓名：        宿    川    

指导教师：        姚    骑    均    研    究    员    

完成日期：        2018    年    5    月    22    日



## 摘要

超导隧道结(SIS)因其极高的探测灵敏度已经成为太赫兹天文探测领域最重要的探测器之一。得益于先进的薄膜制备工艺,在低频段超导隧道结性能已经接近量子噪声极限。在地面影响探测性能的主要因素是地球大气的吸收与发射,尤其是水汽的影响最大。南极内陆和空间观测是减小和突破大气限制的两种有效方式,然而这样极端环境下往往面临能源和可靠性等问题。为了解决这些问题,寄希望于研制较高工作温区的 SIS 探测器,一方面既能缓解对制冷系统的要求,同时又能实现优异的性能。此外,尽管目前国际空间太赫兹天文与大气观测已经部署了大量先进的仪器设备,但我国太赫兹天文设备整体投入较晚,目前仍然紧缺先进的太赫兹天文与大气观测装置,严重限制了我国太赫兹天文学与大气科学的发展。

为此,本论文将重点围绕以下几点展开:1)太赫兹超导辐射波谱仪的系统测试,以熟悉和了解大气科学对太赫兹接收系统的技术要求;2)8K 温区快速测试杜瓦的搭建以及光路设计与仿真,以为高临界温度超导隧道结(SIS)探测器实验测量做准备;3)用单粒子束辐照实验模拟宇宙空间粒子环境研究高能粒子对全 NbN SIS 结性能的影响。

本论文参与测试的太赫兹大气超导辐射波谱仪目前已运行于我国西藏羊八井观测站。模拟宇宙空间粒子环境的单粒子束辐照实验,将为我国未来的空间太赫兹探测可行性与可靠性研究奠定了良好的基础。

关键字:太赫兹;超导隧道结;空间探测



## Abstract

SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor) mixer has become one of the most important detectors in the terahertz astronomical exploration fields due to its ultra-high sensitivity. Thanks to the advanced thin-film fabrication, superconducting SIS mixers have reached a sensitivity close to quantum limit at the low terahertz frequency band. The main factor affecting the detection performance on the ground is the absorption and reflection of the earth's surroundings, especially the influence of water vapor. Antarctic and space observations are two effective ways to reduce or break through atmospheric constraints. However, such extreme environments often face problems such as lack of power supply and reliability. In order to solve these problems, it is hoped that new SIS mixers capable of operating in a relatively high temperature region can be developed so as to relieve the pressure of refrigeration equipment and achieve excellent performance at the same time. In addition, a large number of advanced instruments and equipment have been deployed in terrestrial astronomical and atmospheric observatories, and the current lack of advanced terahertz astronomical and atmospheric observation instruments severely limits terahertz astronomy and atmospheric science developing in China.

Therefore, this paper will focus on the following points: 1) Test of APSOS system to familiarize with and understand the technical requirements of atmospheric science for terahertz receiver systems; 2) Constructing a dewar in 8K temperature zone as well as designing and simulating its optical path, in preparation for experimental measurements of high critical temperature SIS detectors; 3) Exploring the influence of high-energy particles on the full NbN SIS junction's performance by using a single particle beam irradiation experiment to simulate the high-energy particles environment in the space.

The APSOS system tested in this paper has been operated on the Yangbajin observatory in Tibet, China. The single particle beam irradiation experiment simulating the particle environment in the space lays a good foundation for the future research on the feasibility and reliability of space terahertz detection.

**Key words:** terahertz; SIS; space observation



## 目录

第一章 绪论.....	9
1.1 太赫兹频段基本特征.....	9
1.2 太赫兹技术的天文应用.....	10
1.2.1 天文大气窗口.....	10
1.2.2 太赫兹天文观测的困难与进展.....	10
1.2.3 太赫兹天文学的发展与应用.....	12
1.3 太赫兹技术大气应用.....	14
1.4 太赫兹技术其他应用.....	14
1.5 太赫兹探测技术.....	15
1.6 太赫兹探测器.....	16
1.7 超导隧道结混频器的研究现状.....	17
1.8 本论文内容概要.....	18
第二章 超导体的基本电磁特性.....	20
2.1 超导体发现简史与理论的发展.....	20
2.2 超导宏观理论.....	21
2.2.1 二流体模型.....	21
2.2.2 London 方程与超导电动力学.....	21
2.2.3 Pippard 穿透深度.....	22
2.2.4 Ginzburg-Landau 唯象理论.....	22
2.3 超导微观理论.....	22
2.3.1 电子—声子相互作用模型.....	22
2.3.2 BCS 理论.....	23
2.4 超导隧道结 (SIS) 基本理论.....	24
2.4.1 超导隧道结简介.....	24
2.4.2 准粒子隧道效应.....	25
2.4.3 光子辅助的准粒子隧道效应.....	26
2.4.4 Cooper 对隧道效应.....	26
2.5 混频原理.....	28
2.6 小结.....	28
第三章 太赫兹超导波谱仪系统测试与性能表征.....	30

3.1 太赫兹辐射波谱仪（简称 APSOS）简介.....	30
3.2 外差接受机性能表征基本参数及方法.....	32
3.3 本振基频信号干扰与滤波.....	33
3.4 接收机性能参数测试标定.....	34
3.4.1 接收机稳定性测试.....	34
3.4.2 系统噪声与射频噪声测试.....	35
3.5 小结.....	36
第四章 全 NbN SIS 结测试平台设计.....	37
4.1 921 项目全 NbN 超导隧道结测试平台搭建.....	37
4.1.1 921 项目简介.....	37
4.1.2 测试杜瓦搭建.....	37
4.2 杜瓦光路设计.....	38
图 4-3 杜瓦设计框图.....	38
4.2.1 透镜设计.....	40
4.2.2 椭球反射镜计算.....	41
4.3.3 光路仿真.....	42
4.4 本章小结.....	43
第五章 基于空间运用的全 NbN SIS 结可靠性测试.....	44
5.1 全氮化铌 SIS 隧道结特征与研究进展.....	44
5.2 全 NbN SIS 直流温变特性测试.....	45
5.2 NbN SIS 结空间运用可行性分析与可靠性研究.....	46
5.2.1 NbN SIS 结空间运用可行性分析.....	46
5.2.2 NbN SIS 结空间运用可靠性测试.....	47
5.3 射频噪声温度与 SIS 结温度关系的探究.....	52
5.4 本章小结.....	53
第六章 总结.....	54
参考文献.....	55
附录一 中频噪声温度测试方法.....	57
论文发表情况.....	59
致谢.....	60



# 第一章 绪论

## 1.1 太赫兹频段基本特征

太赫兹波通常被认为是频率介于 0.1 -- 10 THz 的电磁波，与部分红外波段和微波波段重叠，处于宏观电子学到微观光子学的过渡区域，覆盖了部分凝聚态物质和生物大分子的转动和集体振动频率，具有丰富的原子和分子谱线。成熟的微波和光学技术不能完全适用于太赫兹波，长期以来，由于缺乏大功率太赫兹波产生以及太赫兹检测技术，使得太赫兹波是目前唯一还未完全开发的电磁波段，通常又被称为“THz Gap”。由于太赫兹波位于微波和光学波段的过渡区域，使得太赫兹波具有独特的性质，具体表现为以下几点：

1) 普遍性：自大爆炸以来，宇宙空间中约一半的光子能量分布于太赫兹频段，大气中也分布着丰富的太赫兹辐射源，2.7 K 的宇宙微波背景辐射峰值也位于太赫兹波段。

2) 高透射性：太赫兹光子能量相对较小，1THz 的太赫兹光子能量约为 4.1meV，通常低于非金属材料的能带能量，能透射大部分非金属物质，例如衣服、纸板以及塑料等，可对不透明物质进行透射成像。

3) 非电离性：由于太赫兹光子能量较低，远小于 X 射线光子能量，不会导致光致电离而破坏被检物质，非常适用于人体以及其他活性生物群体的生物医学成像检测。

4) 大容量视距传输性：相对于传统通信，太赫兹波由于频率较高，能实现传输信号 GHz 以上带宽，利用太赫兹波进行无线通信，可以极大地增大无线通信网络的带宽，实现海量数据的快速传输。由于水汽和氧气等大气成分对太赫兹波具有极强的吸收性，太赫兹波在空气中只能视距传输。

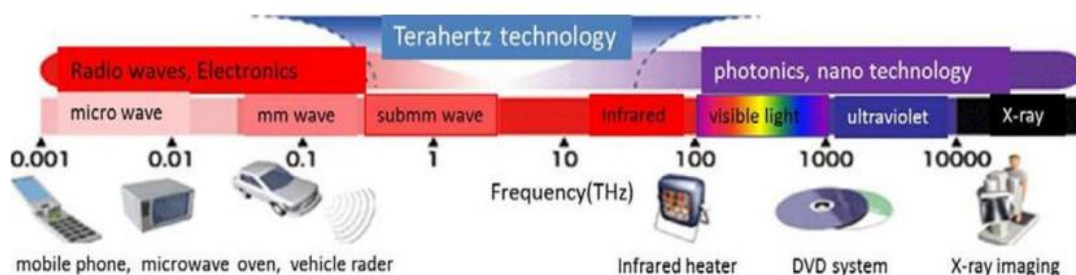


图 1-1 电磁波谱图

## 1.2 太赫兹技术的天文应用

### 1.2.1 天文大气窗口

按信号的产生机制来分，宇宙空间中的电磁波信号主要分为由热运动产生的连续谱信号和原子分子跃迁产生的发射线信号。由于电离和中性大气对入射到地球表面的电磁辐射会产生连续吸收或线吸收，不少波段的天体辐射无法穿过地球大气，能穿过大气的波段，称为大气窗口<sup>[1][2]</sup>。最主要的大气窗口是光学窗口和射电窗口，此外还有一个不完整的红外窗口。

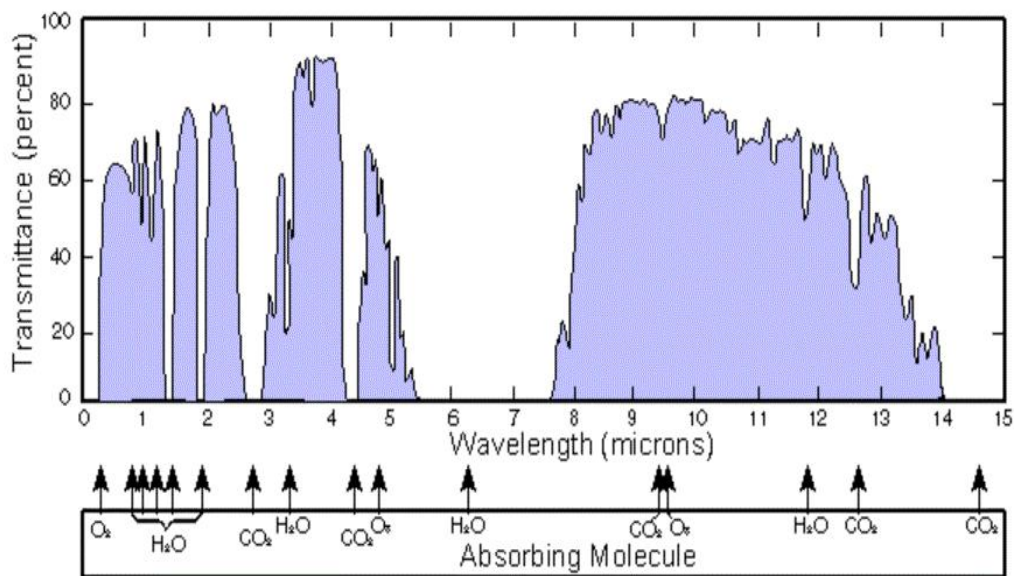


图 1-2 不同波长电磁波的大气透过率 (from Google)

由于太赫兹波介于微波和红外波段之间，受大气对流层的吸收效应比较明显。大气对太赫兹波的线吸收主要是受大气中水汽分子的转动跃迁等引起，而连续谱吸收在很宽的频带内都能观测到，目前具体机理尚未完全清楚，但普遍认为这是由于分子之间的碰撞所致。

### 1.2.2 太赫兹天文观测的困难与进展

来自宇宙空间的太赫兹信号往往产生于比较冷暗的物质，例如分子云，且辐射强度相对较弱，而大气中水汽和氧气等成分对太赫兹波又具有极强的吸收性，因此，地面直接探测来自遥远天体的微弱信号比较困难，至少有以下几个方面的挑战：一是太赫兹探测器必须具有极高的灵敏度；二是观测台址当地的空气中氧