

分类号 P1 天文学

密级 公开

UDC 520 天文学

编号 800212008B07

中国科学院研究生院 博士学位论文

太赫兹频段氮化铌超导隧道结混频特性研究及天文应用

李婧

指导教师 史生才 研究员 博士

中国科学院紫金山天文台

申请学位级别 博士学位 学科专业名称 天体物理

论文提交日期 2008.10.17 论文答辩日期 2008.10.31

培养单位 中国科学院紫金山天文台

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 方大纲

摘要

高灵敏度超导混频技术是推动天体物理前沿领域—太赫兹天文观测研究发展的重要因素之一。目前，已被广泛应用的铌超导隧道结的灵敏度已接近量子极限，但其能隙频率仅为 0.7 THz。高于该频率，超体会吸收光子能量拆散其中 Cooper 对（能量耗散过程），进而导致探测灵敏度恶化。因此，研究基于更高能隙超导体的太赫兹混频技术具有特别重要的意义。氮化铌超导隧道结的能隙频率是铌的两倍，其制备技术近年来取得很大进展，但较于铌隧道结的优势尚未显现，也未实现天文观测应用。

基于上述背景，本文开展了太赫兹频段氮化铌超导隧道结量子混频特性的系统研究，并利用研制的 0.5-THz 频段氮化铌超导隧道结混频器开展天文试验观测。取得的主要研究成果包括：1) 实现基于高介电常数 MgO 基板的 0.4~0.6THz 宽带波导型信号耦合回路的数值模拟；2) 成功制备能隙电压高达 5.6mV、质量因子高达 15 的全氮化铌超导隧道结；3) 研制的 0.5-THz 频段波导型氮化铌超导隧道结混频器的实测接收机噪声温度低达五倍量子极限，是同频段氮化铌超导隧道结实现的最好噪声性能；4) 首次实验展示了氮化铌超导隧道结在高达 10 K 温区仍有接近量子极限的噪声性能、以及不易受 Josephson 效应干扰（更高稳定性）的独特优势；5) 在国际上首次实现应用氮化铌超导隧道结的天文观测。

本文研究工作对氮化铌超导隧道结的太赫兹频段量子混频特性有了更深入的理解，实现了接近量子极限探测灵敏度以及天文试验观测，并展示了其宽工作温度区间和高稳定性等独特优势，为将来实现 1 THz 以上频率氮化铌超导混频技术的应用（特别是空间及大规模系统）打下重要基础。

关键词：太赫兹，氮化铌，超导隧道结，混频器，噪声温度

Abstract

Jing LI (Astrophysics)

Supervised by: Sheng-Cai SHI

High-sensitivity superconducting SIS (superconductor-insulator-superconductor) mixers are playing an increasingly important role in terahertz (THz) astronomical observations, which is an emerging research frontier in modern astrophysics. Superconducting SIS mixers with niobium (Nb) tunnel junctions have reached a sensitivity close to the quantum limit, but have a frequency limit about 0.7 THz (i.e., gap frequency of Nb tunnel junctions). Beyond this frequency Nb superconducting films will absorb energetic photons (i.e., energy loss) to break Cooper pairs, thereby resulting in significant degradation of the mixer performance. It is therefore of particular interest to develop THz superconducting SIS mixers incorporating tunnel junctions with larger energy gap. Niobium-nitride (NbN) superconducting tunnel junctions have long been known for their large energy gap, almost double that of Nb ones. But it is until recently that the fabrication technology of NbN superconducting tunnel junctions is considerably improved, with the introduction of epitaxially grown NbN films. Nevertheless, their performance is still not as good as Nb ones, and furthermore they are not yet demonstrated in real astronomical applications.

Given the facts mentioned above, in this paper we systematically studies the quantum mixing behaviors of NbN superconducting tunnel junctions in the THz regime and demonstrate an astronomical testing observation with a 0.5-THz superconducting SIS mixer developed with NbN tunnel junctions. The main results of this study are as follows, 1) successful design and fabrication of a 0.4~0.6 THz waveguide mixing circuit with the high-dielectric-constant MgO substrate, 2) successful fabrication of NbN superconducting tunnel junctions with the gap voltage reaching 5.6 mV and the quality factor as high as 15, 3) demonstration of a 0.5-THz waveguide NbN superconducting SIS mixer with a measured receiver noise temperature (no correction) as low as five times the quantum limit ($5\hbar\omega/k_B$), which is the best among NbN superconducting SIS mixers developed in this frequency band, 4) demonstration of high sensitivity for NbN

superconducting SIS mixers operated at temperatures even as high as 10 K, and demonstration of much less interference resulting from the Josephson effect, and 5) demonstration of the first astronomical observation ever done with an NbN superconducting SIS mixer.

This study has provided further understanding of the quantum mixing behaviors of NbN superconducting SIS mixers. It has been demonstrated that NbN superconducting SIS mixers can reach nearly quantum-limited sensitivity and have good stability. Furthermore, NbN superconducting SIS mixers have less stringent requirement for cooling and magnetic field than Nb ones. Hence they can find good use in astronomical applications, especially with space-borne projects and complex systems such as multi-beam receivers.

Key Words: Terahertz (THz), niobium-nitride (NbN), superconductor-insulator-superconductor (SIS), mixer, noise temperature

目录

摘要.....	I
目录.....	IV
第一章 引言.....	1
1.1 太赫兹频段基本特征	1
1.2 太赫兹频段科学意义及应用前景.....	3
1.2.1 太赫兹波段天文研究.....	3
1.2.2 太赫兹波段大气观测研究.....	5
1.2.3 其它领域应用前景.....	6
1.3 太赫兹频段探测技术	7
1.3.1 相干和非相干探测.....	8
1.3.2 太赫兹相干探测技术.....	9
1.3.3 高能隙超导 SIS 混频技术.....	10
1.4 本论文研究内容概要	11
参考文献.....	13
第二章 超导体及其电磁特性.....	16
2.1 超导体及基本特性	16
2.2 超导基本理论	18
2.2.1 伦敦 (London) 方程	19
2.2.2 金兹堡-朗道 (GL) 方程 (唯象理论)	20
2.2.3 BCS 理论.....	21
2.3 超导体特征长度	24
2.3.1 Local 和 nonlocal 欧姆定律.....	24
2.3.2 Clean limit 和 dirty limit.....	25
2.3.3 超导体相干长度.....	26
2.3.4 超导体穿透深度.....	27
2.3.5 特征长度与正常态电阻率.....	29
2.4 超导体复电导率和表面阻抗	30
2.4.1 超导体复电导率.....	30
2.4.2 超导体表面阻抗.....	32
2.5 Josephson 效应.....	33
2.5.1 直流 Josephson 效应	33
2.5.2 交流 Josephson 效应	34
2.5.3 磁场效应.....	35
2.6 小结	36
参考文献.....	37

第三章 超导量子混频理论	38
3.1 经典混频理论.....	38
3.1.1 混频大信号分析.....	39
3.1.2 混频小信号分析.....	40
3.1.3 混频噪声分析.....	42
3.2 超导隧道结及光子辅助准粒子隧穿效应.....	45
3.2.1 超导隧道结及特性.....	46
3.2.2 光子辅助准粒子隧穿效应.....	49
3.3 量子混频理论.....	51
3.3.1 超导 SIS 结隧穿电流响应.....	51
3.3.2 超导 SIS 结小信号导纳矩阵和噪声电流相干矩阵.....	52
3.3.3 多超导 SIS 结情形.....	53
3.3.4 超导量子混频基本特性.....	54
3.4 小结.....	55
参考文献.....	55
第四章 基于 NbN/AlN/NbN 超导隧道结和 NbN/SiO₂/Nb 调谐电路的 0.5-THz 频段波导型 SIS 混频器	57
4.1 简介.....	57
4.2 0.5-THz 频段波导型宽带信号耦合电路.....	58
4.2.1 波导-微带转换电路.....	58
4.2.2 射频滤波器.....	59
4.2.3 嵌入阻抗特性.....	60
4.3 0.5-THz 频段 NbN 超导 SIS 混频电路.....	63
4.3.1 单 NbN 超导 SIS 结参数.....	63
4.3.2 隧道结调谐和阻抗变换电路.....	64
4.3.3 混频器量子混频特性.....	67
4.4 SIS 混频器基座制备.....	68
4.5 小结.....	69
参考文献.....	69
第五章 0.5-THz 频段波导型氮化铌超导 SIS 混频器芯片制备	73
5.1 掩模板设计.....	73
5.2 材料选择及特性.....	74
5.2.1 基板材料.....	74
5.2.2 势垒材料.....	75
5.2.3 绝缘层材料.....	76
5.3 0.5-THz 波导型氮化铌超导 SIS 结制备工艺.....	76
5.3.1 NbN/AlN/NbN 三层结构 (tri-layer) 形成.....	77
5.3.2 氮化铌超导 SIS 结定义及绝缘层和引线层生成.....	79
5.3.3 制备工艺及结果总结.....	79
5.4 0.5-THz 波导型氮化铌超导 SIS 结直流特性及超导芯片后处理.....	82

5.4.1 直流特性及分析.....	82
5.4.2 超导芯片后处理.....	82
5.5 小结.....	83
参考文献.....	84
第六章 0.5-THz 波导型 NbN 超导 SIS 混频器噪声特性的实验研究	86
6.1 集成 bias-T 和超导 SIS 芯片安装.....	86
6.1.1 集成 bias-T	86
6.1.2 超导 SIS 芯片安装.....	87
6.2 实验测试系统	88
6.2.1 噪声温度测试系统.....	88
6.2.2 准光学射频/本振信号传输光路.....	90
6.3 0.5THz 波导型 NbN 超导 SIS 混频器噪声特性.....	91
6.3.1 系统等效噪声温度.....	91
6.3.2 射频输入噪声 T_{RF} 和中频噪声 T_{IF}	92
6.4 Aging 效应研究.....	95
6.5 小结.....	96
参考文献.....	97
第七章 基于 NbN/AlN/NbN 超导隧道结和 NbN/MgO/NbN 调谐电路的 0.5-THz 频段波导型 SIS 混频器.....	98
7.1 简介.....	98
7.2 新型波导混频电路设计及特性	99
7.2.1 低嵌入阻抗信号耦合电路.....	99
7.2.2 无阻抗变换 NbN 超导 SIS 混频电路	102
7.2.3 设计总结.....	105
7.3 结合 NbN/MgO/NbN 调谐电路的全 NbN 超导隧道结制备.....	105
7.4 基于 NbN/MgO/NbN 调谐电路的 0.5-THz 频段 NbN 超导 SIS 混频器特性.....	107
7.4.1 噪声温度特性.....	107
7.4.2 本振功率需求.....	108
7.4.3 FTS 直接检波特性.....	109
7.4.4 中频输出功率稳定性.....	110
7.5 小结.....	111
参考文献.....	112
第八章 0.5-THz 频段 NbN 和 Nb 超导 SIS 结混频器特性比较	114
8.1 简介	114
8.2 0.5-THz 波导型 Nb 超导 SIS 混频器	115
8.3 0.5-THz 频段 NbN 和 Nb 超导 SIS 混频器噪声温度的温变特性比较	116
8.4 0.5-THz 频段 NbN 和 Nb 超导 SIS 混频器中频输出功率稳定性比较	119
8.5 小结.....	120
参考文献.....	121

第九章 应用 0.5-THz 频段 NbN 超导 SIS 混频器的天文试验观测	122
9.1 移动式亚毫米波望远镜 (POST)	122
9.2 观测站址	123
9.3 0.5 THz 频段 NbN 超导 SIS 接收机系统	124
9.4 天文试验观测结果	125
9.5 小结	126
参考文献	127
第十章 总结	128
附录一：微尺寸超导隧道结的热熔蜡二次加热的固定安装方法	130
附录二：噪声温度测试方法—Y 因子法	132
附录三：射频噪声温度 T_{RF} 和中频噪声温度 T_{IF} 测试方法	133
本文作者攻读学位期间发表论文与申请专利	135
致 谢	139

第一章 引言

1.1 太赫兹频段基本特征

太赫兹 (THz) 频段一般定义为 0.1~10 THz 的频率区间 (参见图 1.1), 其对应波长范围为 3 mm~30 μm , 覆盖短毫米波至亚毫米波段 (远红外)。与微波和近红外波段不同, 太赫兹辐射与物质的相互作用主要是和分子转动有关。实际上, 这种分子转动相互作用起始于微波频段, 但其强度以约三次方增长, 在几百 GHz 和几个 THz 的频率区间 (即 THz 波段) 达到峰值, 然后以指数衰减 [1]。

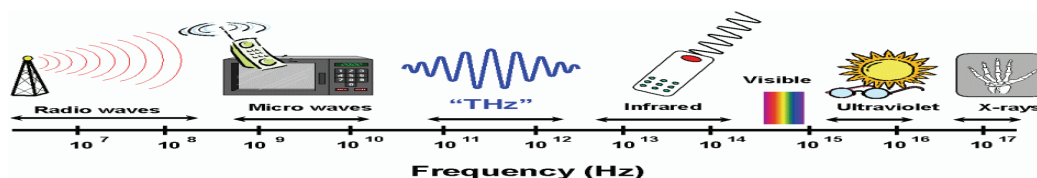


图 1.1 THz 频段在全电磁频谱中的位置

太赫兹频段有强分子吸收和色散、高空间分辨率、超宽带、快速、系统紧凑、低光子能量、以及有限传输范围等诸多特点, 具体说明如下:

1) 能量: 包含约 50% 的宇宙空间光子能量, 几乎相当于紫外、可见光和近红外三个波段能量的总和, 大量星际分子的特征谱线都在 THz 范围;

2) 特征: 大量有机分子转动和振动跃迁、半导体的子带和价带能量在 THz 范围, 可用于指纹识别和结构表征等;

3) 安全性: THz 波的光子能量低, 频率为 1 THz 电磁波的光子能量仅 4.1 meV, 是 X 射线光子能量的约百万分之一, 因此不会引起生物组织的电离, 适合于生物医学成像;

4) 穿透性: THz 辐射能穿透非金属和非极性材料, 如纺织品、纸板、塑料、木料等包装物, 具有穿透烟雾和浮尘的能力。

上述诸多特点决定了太赫兹频段具有非常重要的科学意义和广泛的应用前景。但长期以来, 人们对 THz 电磁辐射特性依然知之甚少, 太赫兹频段仍是一个有待

全面研究和开发的频率窗口（被称为 THz gap）。太赫兹频段位于无线电和光学频段中间，因此该频段的技术涵盖电子学（electronics）和光电子学（photonics）两个领域。制约该频段发展的主要因素有：

1) 太赫兹信号源技术的严重缺乏，包括频率范围和信号功率等。太赫兹频段是电子学研究的最高频段，其波长已与器件尺度可比。当频率 ω 接近 $k_B T / \hbar$ 时，量子现象也开始显现。对于经典信号源（如微波及毫米波段信号源），器件电子渡越区间尺度一般需要远小于波长，这样不会出现相位反转进而产生电子再吸收其释放能量的现象，所以一般存在与器件尺寸相关的频率上限。尽管现代微加工技术已容易实现高质量的亚波长结构，但随着频率的提高，导体电阻率增加和热耗散等问题出现，同样导致电子器件频率上限的限制。另一方面，尽管激光和量子器件可以工作在高阶模结构（耦合多原子或分子系统的集体贡献），但一般较容易在和 $k_B T$ 可比的能量尺度实现 [1]；

2) 太赫兹探测技术的缺乏，包括探测灵敏度、带宽以及响应时间（瞬时带宽）等问题。首先，太赫兹信号源的缺乏严重限制了相干探测技术（需要本振参考信号源）的发展，直到超导混频器的出现才缓和了这一限制。对于半导体相干及非相干探测器（ eV 量级）来说，器件尺度、导体损耗及热耗散等问题（与信号源类似问题）同样存在，而且响应时间慢（特别是在非相干探测情况）。基于量子器件的探测器则存在与自由空间波束耦合效率低的问题。另外，为了减小热噪声，太赫兹探测技术需要在极低温下工作，这也限制了该项技术的应用和发展；

3) 大气衰减对应用的限制，大气衰减主要取决于 THz 波与大气中转动分子（主要是氧和水分子）的相互作用以及与大气颗粒（水及雾）的散射。这两个效应（特别是前者）在太赫兹波段都很显著，导致该波段的信号衰减达到峰值（实际上在该频率区间的变化也非常明显）。尽管这一强相互作用使得该波段非常适合分子科学研究（大部分分子尺寸大于水分子，使得吸收频率低于水分子），但是信号衰减确实影响了该频段那些需要良好大气透过率的实际应用（如天文学）[1]。