

分类号\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_公开\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号 800212007B06

# 中国科学院研究生院

## 博士学位论文

准光学型超导 HEB 热电子混频器的 THz 混频特性研究

蒋 玲

指导教师 史生才 研究员

中国科学院紫金山天文台

申请学位级别 博士 学科专业名称 天体物理

论文提交日期 2007 年 4 月 论文答辩日期 2007 年 5 月

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 吴培亨

## 摘要

THz 频段有丰富的科学和技术应用前景，是目前天文和大气物理研究的重点波段。高灵敏度接收机研制是该频段的主要技术挑战之一。超导 HEB (Hot Electron Bolometer) 热电子混频技术是基于微米/纳米尺度超导薄膜的强非线性电阻-温度 ( $R-T$ ) 效应实现高灵敏度和宽瞬时带宽 (短时间常数) 的一种外差混频技术，同时具有射频频率相关性弱和需求本振功率低的优点，是目前亚毫米波至远红外波段灵敏度最高的检测技术。

超导 HEB 混频器因其 NbN 薄膜仅纳米尺度厚，易受机械振动、温度波动及电子干扰等影响，因此都是在液氦环境下测试。为了适于长期的天文和大气观测应用，本文围绕超导 HEB 热电子混频器在 4-K 闭环制冷环境下的混频特性研究，开展了如下工作：

研究了准光学超导 HEB 热电子混频器的直流性能受 4-K 闭环制冷机的温度波动、机械振动和电子干扰的影响，并发现其与温度波动的对应关系。同时表征了超导 HEB 混频器直流参数的时变特性和生命时间。

成功测试了 THz 频段准光学超导 HEB 热电子混频器在 4-K 闭环制冷环境中的噪声性能。超导 HEB 热电子混频器在 0.5 和 0.85 THz 的实测噪声温度分别达到 750 和 1000 K (未校准准光学损耗)。并详细表征了超导 HEB 混频器噪声温度的频率相关性。

测试了超导 HEB 混频器的中频增益带宽、本振功率需求、和直接检波效应。超导 HEB 混频器在最佳偏置点处的中频增益带宽为 1.5 GHz。详细研究了超导 HEB 混频器的本振功率需求与超导 NbN 微桥长度、宽度和临界电流密度的关系。小体积超导 HEB 混频器的本振功率需求仅为 100 nW。超导 HEB 混频器的直接检波效应被发现与超导 NbN 微桥的体积基本无关，直接检波效应对超导 HEB 混频器噪声温度的影响小于 5%。

重点研究了超导 HEB 混频器在 4-K 闭环制冷环境下的稳定性。超导 HEB 混频器在最佳工作点处的稳定时间 (用 Allan 时间表示) 为 1.5 秒，在两倍最佳偏压处的 Allan 时间为 2.5 秒。超导 NbN 微桥的体积越大，超导 HEB 混频器的动态阻抗越小，从而混频器的中频输出功率稳定性越好。

## 准光学型超导 HEB 热电子混频器的 THz 混频特性研究

**关键词：**THz，超导 HEB 热电子混频器，4-K 闭环制冷，噪声温度，系统稳定性。

# Investigation of THz Mixing Performance for Quasi-Optical Superconducting HEB Mixers

Ling Jiang (Astrophysics)

Directed by Sheng-Cai Shi

## Abstract

It is well known that the THz region is rich in scientific and technological opportunities, and is an important band for astronomy and atmospheric research. Developing a high-sensitivity detectors, capable of operating in this region, is one of significant technological challenges. Superconducting HEB (Hot-Electron-Bolometer) mixing technology is a heterodyne mixing technology of high sensitivity and broad instantaneous bandwidth (short time constant), based on the strong nonlinear resistance vs. temperature ( $R$ - $T$ ) response of superconducting ultrathin film of the order of micrometer or nanometer. Superconducting HEB mixers become the most sensitive detecting technology from submillimeter to far infrared wavelengths, combined with the performances of insensitive RF frequency dependence and low LO power requirement.

Superconducting HEB mixers are traditionally measured with a liquid helium cryostat, since HEB devices (about several nanometer thick for NbN phonon-cooled devices) are quite sensitive to the mechanical vibration, temperature fluctuation, and electrical interference and so on. For the sake of long-period operations such as astronomical and atmospheric observations, this thesis focuses on the investigation of mixing performance of superconducting HEB mixers with a close-cycled 4-K refrigerator. It is outlined as follows:

The effect of the temperature fluctuation, mechanical vibration, and electric interference of the close-cycled 4-K refrigerator on the dc performance of the quasi-optical superconducting HEB mixers is investigated. The dc performance of superconducting HEB mixers were found to correlate with temperature fluctuation. The time dependence and lifetime of the dc parameters of the superconducting HEB mixers were also characterized.

The noise performances of THz quasi-optical superconducting HEB mixers cooled by a close-cycled 4-K refrigerator were successfully measured. The measured uncorrected noise temperature of the superconducting HEB mixer at 0.5 and 0.85 THz is 750 and 1000 K respectively. The frequency dependence of noise temperature of superconducting HEB mixers is characterized.

The IF gain bandwidth, LO power requirement, and direct detection response of superconducting HEB mixer were measured. The measured IF gain bandwidth is 1.5 GHz at optimum working point. The dependence of LO power requirement of superconducting HEB mixer on the length and width of superconducting NbN bridge and critical current density was also investigated. The LO power requirement is 100 nW for superconducting HEB device of small size. The direct detection response of superconducting HEB mixers is found to be nearly independent of the volume of superconducting NbN bridge. The effect of the direct detection response for the measurement of noise temperature is less than 5 %.

The stability of the superconducting HEB mixer under the close-cycled 4-K refrigerator was investigated. The measured Allan time is 1.5 second at the dc-bias voltage exhibiting the lowest noise temperature and increases to 2.5 second at a dc bias twice that voltage. The larger the volume of superconducting NbN bridge is, the smaller the dynamic resistance is, the higher the stability of IF-output-power becomes.

**Keywords: THz, superconducting HEB mixer, close-cycled 4-K refrigerator, noise temperature, system stability.**

## 目录

<b>第一章 绪论</b>	<b>1</b>
§ 1.1 THz 频段的科学意义及应用前景.....	1
§ 1.1.1 射电天文和地球大气观测.....	1
§ 1.1.2 THz 电磁波的其他应用.....	3
§ 1.1.3 THz 频段关键技术及发展趋势.....	4
§ 1.2 THz 频段相干探测技术.....	5
§ 1.2.1 半导体 Schottky 二极管混频技术.....	5
§ 1.2.2 超导 SIS 隧道结混频技术.....	6
§ 1.2.3 超导 HEB 热电子混频技术.....	6
§ 1.3 论文概要.....	6
<b>第二章 超导 HEB 热电子混频理论</b>	<b>8</b>
§ 2.1 低温超导研究背景.....	8
§ 2.1.1 低温超导体基本特性.....	8
§ 2.1.2 London 方程.....	10
§ 2.1.3 Ginzburg-Landau 理论.....	11
§ 2.1.4 BCS 理论.....	12
§ 2.2 热电子混频基本原理.....	13
§ 2.2.1 Bolometer 信号探测.....	13
§ 2.2.2 Bolometer 混频原理.....	15
§ 2.2.3 热电子混频原理.....	16
§ 2.3 超导 HEB 热电子混频器特性.....	19

§ 2.3.1 变频增益特性.....	19
§ 2.3.2 小信号电阻特性.....	23
§ 2.3.3 噪声特性.....	26
§ 2.3.4 中频增益和噪声带宽特性.....	31
§ 2.3.5 超导 HEB 混频器的本振功率需求.....	33
§ 2.4 超导 HEB 热电子混频理论模型.....	33
§ 2.4.1 标准模型.....	34
§ 2.4.2 一维 Bolometer 模型.....	35
§ 2.4.3 热点 (hot spot) 模型.....	37
§ 2.4.4 包含 Andreev 反射和临界电流变化的热点模型.....	39
§ 2.4.5 理论模型比较.....	40
§ 2.5 超导 HEB 热电子混频技术研究前沿.....	41
<b>第三章 准光学超导 HEB 热电子混频器及测试系统</b>	<b>42</b>
§ 3.1 准光学型超导 HEB 混频器.....	42
§ 3.2 准光学平面天线.....	46
§ 3.2.1 准光学平面天线.....	48
§ 3.2.2 透镜集成天线.....	51
§ 3.2.3 透镜防反射膜.....	55
§ 3.3 测试系统及方法.....	56
§ 3.3.1 4-K 闭环制冷系统.....	56
§ 3.3.2 本振信号源.....	57
§ 3.3.3 混频特性测试系统.....	57
<b>第四章 准光学超导 HEB 混频器在 4-K 闭环制冷环境下的直流特性</b>	<b>62</b>
§ 4.1 超导 HEB 混频器件的直流特性与温度波动特性.....	62

§ 4.1.1 超导 HEB 混频器直流特性测试系统.....	62
§ 4.1.2 超导 HEB 混频器的直流 I-V 特性.....	63
§ 4.1.3 超导 HEB 混频器的 R-T 特性.....	65
§ 4.2 超导 HEB 混频器件直流参数的时变特性.....	67
§ 4.3 总结.....	69
<b>第五章 THz 频段准光学超导 HEB 混频器的混频特性</b>	<b>71</b>
§ 5.1 超导 HEB 混频器的噪声温度和变频损耗特性.....	71
§ 5.1.1 超导 HEB 混频器噪声温度测试和光路损耗分析.....	71
§ 5.1.2 超导 HEB 接收机噪声性能优化.....	75
§ 5.1.3 超导 HEB 混频器噪声特性的频率相关性.....	83
§ 5.2 超导 HEB 混频器噪声特性与环境温度及临界电流的相关性.....	87
§ 5.3 超导 HEB 混频器的本振功率需求.....	89
§ 5.4 超导 HEB 混频器的直接检波效应.....	90
§ 5.5 超导 HEB 混频器的中频增益带宽.....	93
§ 5.6 微弱信号探测实验.....	95
§ 5.7 总结.....	96
<b>第六章 准光学超导 HEB 混频器的稳定性研究</b>	<b>98</b>
§ 6.1 Allan 方差简介.....	98
§ 6.2 超导 HEB 混频器的 Allan 方差时间.....	99
§ 6.3 总结.....	102
<b>第七章 总结</b>	<b>104</b>
<b>参考文献</b>	<b>105</b>



本文作者在攻读博士学位期间发表的论文	113
致谢	116

## 第一章 绪论

### 1.1 THz 频段的科学意义及应用前景

自古以来，人类就对我们生存的宇宙产生着浓厚的兴趣，人类对宇宙的研究覆盖了大部分电磁波谱，一直从射电波到 $\gamma$ 射线，其中仍有一部分电磁波谱还没有被人类所完全认识，而这些电磁波频段正是研究星系，恒星和行星的起源及本质的重要手段。THz 频段就是其中之一，定义为波长在 3-0.03 mm，频率在 0.1-10 THz 的电磁波段。通过探测 THz 波段的电磁波光谱，人们可以研究星系的演变、恒星形成、星际介质及化学元素的起源。THz 频段电磁波辐射信号也为彗星和行星的大气和宇宙背景辐射研究提供了丰富的信息。近些年来，THz 频段技术的应用除了射电天文和大气物理研究以外，还运用于 THz 通信、短程高灵敏度雷达系统、医学和生物学成像、高速卫星通信、地球环境监控以及高速无线网络等。

#### 1.1.1 射电天文和地球大气观测

近十多年来，THz 频段的研究在射电天文领域已经变得越来越重要。早期行星、恒星及星系形成的冷物质（温度在 10-30 K）在远红外和 THz 频段都有很强的辐射信号。一些重要的分子在 THz 频段也有很强的转动谱，这些分子谱线对于研究不同阶段的恒星形成有很重要的意义。下面将简单介绍 THz 频段在射电天文领域的应用。

星系的起源及进化与恒星发射的气体和尘埃形成的星际介质密不可分，同时星际介质中的气体和尘埃星云受重力作用逐渐塌缩又形成了恒星和行星。THz 频段辐射具体表现在下面这些过程：

► 在星系尺度范围内，通过研究尘埃颗粒在 THz 频段的连续谱发射和复杂分子的发射和吸收谱线，可以示踪在塌缩和恒星形成过程中的分子云。当一个星系在形成的初级阶段，由于温度太低不能发射出可见光，但是在 THz 频段有很强的发射。因此观测年轻恒星在远红外和 THz 频段的辐射信号可以研究它们的