约瑟夫森双晶结混频器变频效率测量分析

杨健, 许伟伟*, 李梦月, 花涛, 陈健, 吉争鸣, 吴培亨

南京大学超导电子研究所, 南京 210093

* 联系人, E-mail: wwxu@nju.edu.cn

2009-01-09 收稿, 2009-03-18 接受

国家自然科学基金(批准号: 10874074)、国家重点实验室基金(编号: 9140C5306030806)、国家高技术研究发展计划(编号: 2006AA03Z214)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB310404)资助项目

摘要 开展了基于高温超导双晶结混频器变频效率的研究. 采用离子刻蚀法进行刻蚀, 制备出集成天线的结, 进行了 3 mm 谐波混频的实验, 测量分析了高温超导混频器的变频效率与本振信号功率、微波信号功率、谐波次数、偏置电流等参数之间的关系. 为进一步提高高温超导混频器的变频效率提供了依据, 同时为混频器最佳工作点的选取打下了基础.

关键词
约瑟夫森结
双晶结
谐波混频
变频效率

约瑟夫森结拥有高度非线性与纯电感等特性, 作为混频器时具有灵敏度和谐波次数高、所需的本振和微波信号功率小、变频效率高、噪声低、工作频带宽等诸多优点. 利用高温超导约瑟夫森结的混频特性, 可以组成高灵敏检测系统^[1]以及高稳定度的锁相稳频毫米波信号源^[2], 有着广泛的应用前景. 采用小型制冷机制冷可为超导器件的实用化奠定基础^[3].

为了改善双晶约瑟夫森结与微波信号的耦合, 在结区集成了平面对数周期天线, 混频器性能有明显提升^[4]. 同时采用 Ar(氩)离子刻蚀法^[5]取代传统的稀磷酸腐蚀法制备出结. 对高温超导混频器的一个重要参数——变频效率, 及其与其他参数之间的关系进行了测量及分析, 为亚毫米波段高温超导混频器的实际应用打下了基础.

1 高温超导约瑟夫森结的制备

1.1 集成平面对数周期天线改善结与微波信号的耦合

为了改善结与信号的耦合, 在双晶衬底上制备集成平面对数周期天线的结. 对数周期天线是一种宽频带天线, 天线振子尺寸以 $\ln \tau$ 为周期变化, 在频率 f 和 τf 上具有相同的性能, 天线性能以 $\ln \tau$ 为周期

重复. 其中

$$\tau = \frac{R_n}{R_{n+1}} = \frac{r_n}{r_{n+1}} = \left(\frac{R_n}{r_n} \right)^2 = \sigma^2.$$

平面对数周期天线作为接收微波信号能量的装置, 其结构图如图 1 所示, 结区设计在天线的中心处, 天线臂中央是张角为 β 的分馈线, 旁边连接上长度不同的扇形锯齿振子, 锯齿的张角为 α .

图 1 对数周期天线结构图

引用格式: 杨健, 许伟伟, 李梦月, 等. 约瑟夫森双晶结混频器变频效率测量分析. 科学通报, 2009, 54: 1850~1854

Yang J, Xu W W, Li M Y, et al. Test and analysis of bicrystal Josephson junction mixer's conversion efficiency (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2009, 54: 1850 ~ 1854, doi: 10.1360/972008-1968

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/972008-1968>

尺寸设计: 设定 $\alpha=\beta=\pi/4$ 以形成自补偿结构. 取 $\sigma=\sqrt{2}$, 根据双晶衬底的不同, 设计了不同尺寸的天线. 天线频带宽度为 100 GHz~2.5 THz, 满足亚毫米波信号的实验要求.

1.2 利用离子刻蚀法制备双晶约瑟夫森结

采用酸法腐蚀工艺对结区进行腐蚀, YBCO 薄膜不可避免地接触到水而降低其超导性能, 故我们采用离子刻蚀法(干刻法)来制备双晶结, 解决了酸法腐蚀成功率低、精度低等缺点.

实际制备的双晶结如图 2 所示.

图 2 双晶结实物图

离子刻蚀法是利用宽束中性 Ar 离子轰击样品表面, 对 YBCO 薄膜进行刻蚀. 刻蚀参数为: 能量 500 eV, 束流 40 mA, 中和电流 100 mA. 考虑到长时间连续刻蚀会使得基片温度升高, 降低超导薄膜的高性能, 通过样品上方挡板控制刻蚀间隔时间以冷却基片, 采用 10 s 刻蚀、20 s 遮挡的方式刻蚀. 这样也有效地解决了样品表面的光刻胶由于过热而引起的变性问题. 在前面所述的条件下 Ar 离子刻蚀 YBCO 速度约为 20 Å/min.

图 3 和 4 是根据上述工艺制备出的双晶结的 I - V , 其中 $I_C=600\ \mu\text{A}$, $R_N=3\ \Omega$, 特征电压 $I_C R_N=1.8\ \text{mV}$.

2 约瑟夫森结混频器的变频效率

变频效率是表征输入射频信号转换成中频输出信号的变频效率的量度, 是高温超导混频器性能的重要参数. 对其进行测量并分析与其他参数之间的关系, 对高温超导混频器的实际应用有重要意义.

图 3 I - V 特性(无微波辐照)

图 4 I - V 特性(100 G 微波辐照)

变频效率的定义为

$$\eta = \frac{\eta_{\text{总}}}{\alpha_s} = \frac{\frac{P_{\text{IF}}}{P'_s}}{\frac{P_s}{P'_s}}, \quad (1)$$

式中 η 为约瑟夫森结混频器的变频效率, $\eta_{\text{总}}$ 为整个系统的变频效率, α_s 为微波信号耦合系数, P_{IF} , P_s 和 P'_s 分别为中频输出信号功率、结上微波信号源的资用功率和微波信号功率. 根据约瑟夫森效应理论推导^[6], 约瑟夫森结 I - V 曲线上各阶微波感应台阶(Shapiro台阶)的电流与微波信号加到结上的约瑟夫森交流电流满足

$$\frac{I_n}{I_C} = J_n \left(\frac{I_s}{\Omega I_C} \right) = J_n \left(\frac{eV_s}{\pi \hbar f_s} \right), \quad (2)$$

其中信号归一化频率 Ω 满足

$$\Omega = \frac{\pi f_s}{2eR_N}, \quad (3)$$

式中 I_n 为微波信号辐照下第 n 个电压台阶的电流, I_C

为无微波信号辐照下零台阶的电流, I_S 为结的约瑟夫森交流电流, V_S 为结的约瑟夫森交流电压, f_s 为微波信号频率, R_N 为约瑟夫森结正常态电阻.

测量出外加微波信号辐照下的台阶电流, 利用(2)式对应关系计算出信号源在结上的资用功率.

图 5 是约瑟夫森结的零、一、二台阶电流压缩比与微波信号功率关系的测量值和理论值的对比图(圆圈为实际测量值, 线条为理论值). 从图中可以看到, 零台阶电流与微波信号源的资用功率关系的测量值与理论值完全重合, 因此我们可以利用零阶 Bessel 函数进行变频效率的计算. 通过测量 I_0 (微波信号辐照下的零台阶电流)以及 I_C (超流), 根据(2)式求出对应的 I_S , 再由功率和电流的关系

$$P_S = \frac{1}{8} I_S^2 R_N \quad (4)$$

计算出 P_S , 进而由(1)式求出 α_s 和 η .

图 5 台阶压缩比与归一化微波功率的关系

3 小型脉冲管制冷机谐波混频系统

3.1 谐波混频系统

谐波混频系统由小型脉冲管制冷机、本振信号源、耿氏振荡器、高温超导约瑟夫森结、中频放大器等组成 [7]. 本振信号源产生的本振信号通过同轴线耦合到约瑟夫森结上, 耿氏振荡器产生的信号通过

聚四氟乙烯窗口及扩展半球硅透镜辐照在约瑟夫森结上, 而输出的中频信号则通过电容耦合由半钢电缆引出, 再经过前置放大器放大后输出至频谱分析仪中观测. 小型脉冲管制冷机开机 1 h 即可达实验温度 50 K, 为了减小电磁噪声干扰, 将冷头与真空罩等混频部分放入电磁屏蔽室, 同时约瑟夫森结的四端子测量线全部浮地, 并采用差分输入等降噪方法.

3.2 准光学系统改善结与微波信号的耦合

为了进一步改善超导约瑟夫森结与微波信号的耦合, 在谐波混频系统中采用了准光学耦合系统 [8]. 系统由聚四氟乙烯窗口和扩展半球硅透镜以及有接受天线的双晶约瑟夫森结组成. 双晶结衬底紧贴在硅透镜扩展面上. 由于聚四氟乙烯对亚毫米波的介电常数和微波损耗都很低, 作为窗口材料透过信号. 信号聚焦采用扩展半球硅透镜, 它是由半径为 r 的硅半球和扩展长度为 $d = r/n$ (n 为透镜材料的折射率) 的硅柱体组成, 它与 MgO 衬底有相近的介电常数, 减少了表面波的产生, 同时对亚毫米波有较低的损耗.

4 结果与分析

利用上述系统在 3 mm 波段上、50 K 工作温度下对一系列不同特征参数的双晶约瑟夫森结进行了谐波混频实验, 测量了混频器的变频效率与结特征参数、本振功率和频率、信号功率、直流偏置及谐波次数的关系, 同时为进一步提高双晶约瑟夫森结谐波混频器的工作频率和谐波次数做了一些理论和实验方面的准备工作.

4.1 变频效率和结特征参数的关系

图 6 是一系列双晶约瑟夫森结在 20 次谐波混频

图 6 变频效率和结正常态电阻的关系

图7 变频效率和本振源功率的关系

的变频效率与结的特征参数之间的关系。

4.2 变频效率和本振功率的关系

图7是特征参数为 $I_C=200\ \mu\text{A}$, $R_N=5\ \Omega$ 的结的变频效率与本振功率在谐波次数分别为10和40次时的关系。在10次谐波混频下,由(2)式可见, f_{LO} 较大时即谐波次数较低时, V_{LO} 有一个较大的变化范围,使得台阶随着 $eV_{LO}/\pi\hbar f_{LO}$ 平稳变化;而在 f_{LO} 较小即谐波次数较高时, V_{LO} 的变化会引起 $eV_{LO}/\pi\hbar f_{LO}$ 的剧烈变化,随之引起变频效率剧烈变化。随着本振功率的增加,变频效率达到最大值;之后由于本振功率的增加,由于功率过大引起热噪声,变频效率也随之降低。

4.3 微波信号对变频效率的影响

图8给出了结在3 mm微波辐照下,本振信号功率及频率固定,变频效率随着信号功率的变化情况。可以看出,信号功率较小时,变频效率较高。随着信号功率的升高,变频效率逐渐降低。相比于本振信号功率,信号功率很小,对中频信号的影响微乎其微。弱信号下可以达到很高的变频效率,显示了高温超导约瑟夫森结混频器在检测微弱信号方面的优势。

4.4 变频效率和偏置电流的关系

图9是结在3 mm微波辐照下20次谐波混频的变频效率与偏置电流的关系。可见变频效率在零电流偏置附近有最大值,随着偏置电流的增加,变频效率呈振荡的趋势,在电流变化范围内有一系列极大值,两个极大值对应的电流间隔基本相同。这是由于结的微分电阻变化引起。Shapiro台阶处,微分电阻相对较小,变频效率也较小;而在两台阶之间,微分电阻有极大值,变频效率有极大值。而随着偏置电流的增加,

图8 信号功率和变频效率的关系

图9 微波功率和偏置电流的关系

图10 微波功率和谐波次数的关系

其引起的热噪声也越大,变频效率呈降低趋势。故选择合适的偏置电流对混频器的效率提升有重要意义。

4.5 变频效率和谐波次数的关系

图10给出了4个不同特征电压的结的变频效率

随谐波次数变化的关系. 随着谐波次数的升高, 变频效率呈降低趋势, 谐波次数从 10 增加到 50, 变频效率减少了 15~20 dB.

5 结论

采用离子刻蚀法制备了带有接受天线的双晶约瑟夫森结, 利用小型脉冲管制冷机系统, 采取准光学信号耦合, 进行高温超导谐波混频实验, 研究了约瑟

夫森结混频器的变频效率与其他参数之间的关系, 为低噪声高温超导混频器系统在锁相稳频系统、天文望远镜系统及其他高灵敏检测系统等方面的应用提供了重要依据. 今后, 我们将进一步提高约瑟夫森结的性能, 改善约瑟夫森结同微波信号、本振信号及中频系统的耦合状况, 提高输出的中频信号的信噪比, 从而实现成熟的、实用的高温超导约瑟夫森结混频器.

参考文献

- 1 Nakajima K, Chen J, Myoren H, et al. Terahertz response for bicrystal YBCO Josephson junctions. IEEE Trans Appl Supercond, 1997, 7: 2607[DOI]
- 2 Wang H B, Xu W W, Cheng Q H, et al. Phase locking a 3 mm waveband Gunn oscillator with a high T_c superconducting Josephson junction at 77 K. Appl Phys Lett, 1995, 66: 370—372[DOI]
- 3 杨鲁伟, 周远, 张平生, 等. 空调压缩机驱动高效同轴脉冲管制冷系统. 真空与低温, 1998, 4: 140—142
- 4 许伟伟, 王华兵, 徐美凤, 等. 采用平面天线改善高 T_c 超导 Josephson 结与信号源之间的耦合. 低温物理学报, 1995, 17: 1—4
- 5 刘金声. 离子束技术及应用. 北京: 国防工业出版社, 1995. 172
- 6 Barone A, Paterno G. Physics and Applications of the Josephson Effect. New York: John Wiley & Sons Inc, 1982
- 7 许伟伟, 刘庆国, 吉争鸣, 等. 小型脉冲管制机上的高温超导谐波混频. 科学通报, 2001, 46: 776—778
- 8 张新宇, 葛阳中, 杨森祖, 等. 准光技术改善 Josephson 结与毫米波的耦合. 南京大学学报, 1998, 34: 108—111

Test and analysis of bicrystal Josephson junction mixer's conversion efficiency

YANG Jian, XU WeiWei, LI MengYue, HUA Tao, CHEN Jian, JI ZhengMing & WU PeiHeng

Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing 210093, China

The research work on the conversion efficiency of high-temperature superconductivity bicrystal Josephson junction mixer is reported. Using ion etching, the junction integrated with antenna is prepared. Experiment on harmonic mixing at 3 mm waveband is carried out. The relationship between conversion efficiency and the parameters of local oscillation power, microwave signal power, harmonic order, bias electric current, etc., is tested and analyzed.

Josephson junction, bicrystal junction, harmonic mixing, conversion efficiency

doi: 10.1360/972008-1968