

约瑟夫森结参数对 Shapiro 台阶的影响研究

刘飞连, 周铁戈, 王定城, 李 娜, 赵新杰, 方 兰, 阎少林

(南开大学电子系, 天津 300071)

摘 要: 采用 PSpice 电路仿真的方法, 研究了结电容 C 较小的情况下, 电阻电容并联约瑟夫森结模型的参数 (临界电流 I_c 和正常态电阻 R_n) 对 Shapiro 台阶高度的影响. 发现在射频电流较大的情况下减小 R_n 可以提高台阶的高度, 而在射频电流较小的情况下增加 R_n 可以提高台阶的高度. 保持 R_n 不变, 取不同 I_c 绘制的台阶高度-射频电流幅度曲线表明, 临界电流越大, 曲线所对应的台阶高度也越大. 研究结果对利用约瑟夫森结作为电压标准和 THz 信号检测具有指导意义.

关键词: 约瑟夫森结; Shapiro 台阶; 电压标准; THz 信号检测

中图分类号: TN12 文献标识码: A 文章编号: 0372 2112 (2009) 05 0957 04

Influence of Josephson Junction Parameters on Shapiro Steps

LIU Fei lian, ZHOU Tie ge, WANG Ding cheng, LI Na, ZHAO Xir jie, FANG Lan, YAN Shao lin

(Department of Electronics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The simulating model of Josephson junctions in PSpice is constructed and used in the investigation of Shapiro steps. In the condition of little capacitance, we have researched the influence of resistively and capacitively shunted Josephson junction's parameters, including critical current and normal resistance, on Shapiro steps. We found that it can improve the steps by both to reduce the normal resistance under a larger rf current circumstance and to increase the normal resistance in the condition of a smaller rf current. We also found that the larger the junction critical current, the higher the Shapiro steps, when the junction resistance keeps constant. The results are of important referential value for the voltage standard and THz signal detection by Josephson junctions.

Key words: Josephson junction; shapiro step; voltage standard; THz signal detection

1 引言

约瑟夫森结是一种全新的量子器件^[1], 其突出优点在于具有高度的非线性、极高的工作频率、高分辨率和反应速率、量子极限的灵敏度和低功耗低噪声等^[2]. 约瑟夫森结, 特别是高温超导约瑟夫森结, 具有十分广泛的应用领域, 目前, 利用约瑟夫森结作太赫兹 (THz) 信号的产生与检测^[3]、高精度电压标准等方面的应用受到了广泛的研究和关注. 外加 THz 信号辐照下, 约瑟夫森结的 $I-V$ 特性曲线上会出现 Shapiro 台阶^[4], 第一个台阶电压所对应的约瑟夫森频率就是 THz 信号的频率, 而且在一定范围内根据台阶的高度可以得到相应的 THz 信号功率; 所以, 利用高温超导约瑟夫森结可以进行 THz 信号的检测. 利用约瑟夫森结的微波感应台阶还可以制作电压标准^[5], 其原理与 THz 信号的检测相似, 当有微波

信号施加到约瑟夫森结时, $I-V$ 特性曲线上出现一系列陡变的台阶, 台阶的位置是某个固定电压的整数倍. 而这个电压与外来微波信号频率的关系只依赖于单磁通量子常数 Φ_0 , 与约瑟夫森结的材料和其它性质无关. 由于频率可以很精确地被测定, 这样利用约瑟夫森效应可以得到电压的精确值. 利用约瑟夫森结作为电压标准, 远远优于传统的电压标准. 在电压计量工作中具有重要意义, 现已被确定为国际基准. 2006 年, Klushin A M 等^[6]研究了嵌入 Fabry-Perot 谐振腔里的串联双晶约瑟夫森结阵列的微波辐照特性, 在 75K 温度和 74.4GHz 的频率下, 使 182 个高温超导双晶约瑟夫森结达到相位同步, 并得到了 28mV 的约瑟夫森电压, 这对于电压标准和 THz 检测的应用具有重要的意义.

然而, 关于约瑟夫森结 Shapiro 台阶的研究还有待深入, 比如深入了解约瑟夫森结参数对 Shapiro 台阶的

收稿日期: 2008 04 28; 修回日期: 2008 12 18

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2006AA03Z213); 国家大学生创新性实验计划项目 (No. NK0725); 南开大学百项工程项目 (No. BX6

230)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

影响, 这样对约瑟夫森结作 THz 检测和电压标准的应用才有指导意义. 目前还没有发现相关的报道, 我们采用电路仿真的方法研究了约瑟夫森结参数对 Shapiro 台阶的影响, 本文将要报道我们的研究方法和结果.

2 研究方法

对于约瑟夫森结的电阻电容并联约瑟夫森结模型(RCSJ 模型)而言, 可以视为一个理想的约瑟夫森结 J 与电阻 R 和电容 C 的并联, 其等效电路如图 1 所示, 也可以称为 Stewart-McCumber 模型^[7, 8].

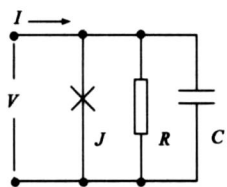


图1 Stewart-McCumber 模型示意图

对于图 1 所示的电路, 在电流源(包含直流电流源和射频电流源)驱动的情况下, 总电流可以表达为:

$$I(t) = I_d = I_n + I_s = \frac{\hbar C}{2e} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{\hbar}{2eR} \frac{d\varphi}{dt} + I_c \sin \varphi \quad (1)$$

式中 $I(t) = I_{dc} + I_f$, I_{dc} 和 I_f 分别为直流电流和射频电流, I_d , I_n 和 I_s 分别表示流过电容、电阻和理想约瑟夫森结的电流. 引入新的时间变量 $\tau = \omega_J t$ 后, 上式可写成:

$$\frac{I(\tau)}{I_c} = \beta_c \frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} + \frac{d\varphi}{d\tau} + \sin \varphi \quad (2)$$

其中

$$\omega_J = \left[\frac{2eI_c}{\hbar C} \right]^{1/2}, \beta_c = \frac{2\pi I_c R^2 C}{\Phi_0} \quad (3)$$

分别称作约瑟夫森结的等离子体频率和 McCumber 参数.

由于约瑟夫森结器件具有高度的非线性, 得到的理论方程也是非线性的, 很多时候不能得到解析解, 只能采用一些近似方法进行理论分析, 比较复杂, 而且可能存在混沌行为^[9], 影响结果的正确性. 而 Pspice 软件是分析和模拟各种电路的强有力工具, 于是我们采用 Pspice 电路仿真的方法^[10]进行研究.

流过理想约瑟夫森结的电流与其两端电压的关系可以表达为:

$$I = I_c \sin\left(\frac{4\pi e}{h} \int V dt + \varphi_0\right) \quad (4)$$

式中, I 是流过约瑟夫森结的电流, V 是约瑟夫森结两端的电压. 不失一般性, 取常数 φ_0 等于 0 就可以得图 2 所示的理想约瑟夫森结的 PSpice 电路模型.

图 2 中 EPOLY 是电压控制电压源, 它用来采集约瑟夫森结两端的电压并送给积分器, 其系数为 1; INTEG 是理想积分器也就是对电压 V 进行积分, 积分系数为 $4\pi e/h = 3038535207019174$; SIN 是正弦函数, 即其输出是输入的正弦函数; GAIN 是放大器, 放大系数就是约瑟夫森结的临界电流, 即 SIN 函数前的系数; GPOLY 是电

压控制电流源, 它用来将电压信号转换为电流信号, 其系数为 1. 可以看出这个电路两端电压与流过电流的关系满足公式(4), 所以这个模型可以看作是理想的约瑟夫森结.

电路连接好之后, 可以进行封装, 在以后使用这个模型的时候只要用封装之后的元件即可. 如果电路中只有一个约瑟夫森结, 也可以直接利用这个模型电路进行仿真, 如果电路中含有多个约瑟夫森结, 那么利用封装之后的元件比较清楚方便.

图 3 给出的是用于仿真研究的等效电路图. 图中 J 代表理想约瑟夫森结, 理想约瑟夫森结上并联一个电阻即可得到 RSJ 模型, 在电路上再并联一个电容即可得到 RCSJ 模型, 研究中我们使用的是 RCSJ 模型. 由于针对微波感应台阶的应用研究多集中与高温超导薄膜双晶晶界结, 它的电容很小, 所以在我们的仿真中 C 的值取很小, 0.5pF. 约瑟夫森结的临界电流取 0.5mA, 正常态电阻 R 取 0.3Ω.

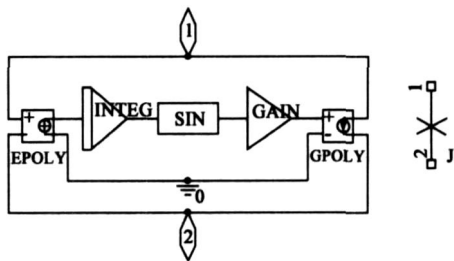


图2 理想约瑟夫森结的等效电路及封装后的电路符号

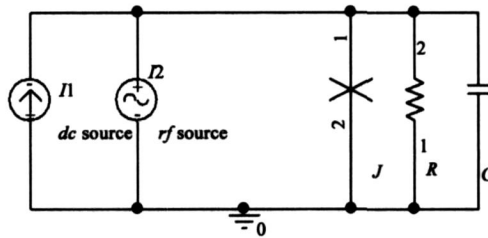


图3 仿真电路模型

图中还包含一个射频电流源(I_2)和一个直流电流源(I_1), 仿真时取射频电流源的频率为 $FREQ = 75GHz$, 直流电流源连续取值用来绘制 $I-V$ 特性曲线. 进行仿真时, 取不同的 I_1 值, 采用瞬态分析, 记录并保存不同参数下约瑟夫森结两端电压随时间变化的曲线, 然后对它求平均就可以绘制出约瑟夫森结的 $I-V$ 特性曲线. 由 $I-V$ 特性曲线就可以得到台阶的高度, 采用这种方式, 我们不断改变射频电流的幅度, 绘制台阶高度对射频电流幅度的关系曲线. 进一步, 改变 RCSJ 模型中约瑟夫森结的正常态电阻和临界电流, 画出台阶高度对射频电流幅度的依赖曲线, 通过对比找到规律.

3 结果和讨论

图 4 给出的是仿真 RCSJ 电路在加射频电流时得到

的 $I-V$ 特性曲线. 仿真时直流偏置电流取在 $0.3\text{mA} \sim 0.9\text{mA}$ 之间, 步长为 $5\mu\text{A}$ 的值. 图中, 一次台阶高度为 $133.4\mu\text{A}$, 台阶位于 0.1556mV 处, 符合约瑟夫森结的电压频率关系.

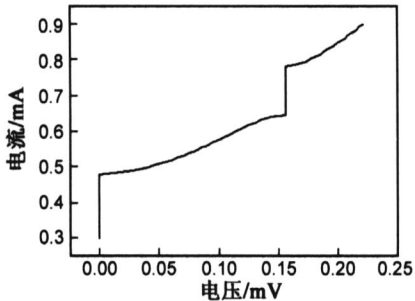


图4 在RCSJ模型中电阻为 0.3Ω 、射频电流为 0.2mA 时的得到 $I-V$ 曲线

图5给出的是保持射频电流频率等其它参数不变, 而取不同的约瑟夫森结电阻绘制出的一次台阶高度随射频电流幅度变化得到的曲线. 其中四条曲线对应的正常态电阻分别为 $0.3\Omega, 0.4\Omega, 0.5\Omega, 0.6\Omega$. 以其中正常态电阻为 0.3Ω 的曲线为例, 它是在射频电流幅度分别取 $0.2\text{mA}, 0.4\text{mA}, 0.6\text{mA}, 0.8\text{mA}, 1\text{mA}, 1.2\text{mA}, 1.4\text{mA}, 1.6\text{mA}, 1.8\text{mA}, 2.0\text{mA}, 2.4\text{mA}, 2.6\text{mA}, 2.8\text{mA}, 3.0\text{mA}$ 和 3.2mA 时得到的. 由曲线可以看出, 随着射频电流幅度的增大, 台阶高度呈现先递增至极大值后又减小的规律. 而且可以看出, 当射频电流为 1.1mA 时的台阶高度最大, 台阶高度为 $511\mu\text{A}$. 而对比图中的四条曲线, 可以得到的结论是, 在 $R = 0.3\Omega \sim 0.6\Omega$ 之间时, R 越大, 各曲线所对应的台阶最大值越小; 而且使之达到最大值所需的射频电流也越小. 还可以得到的结论是, 当射频电流幅度较大时 (大于 1mA), 取较小的正常态电阻能够得到更大的台阶高度; 而当射频电流幅度较小时 (小于 0.3mA), 取较大的正常态电阻能够得到更大的台阶高度.

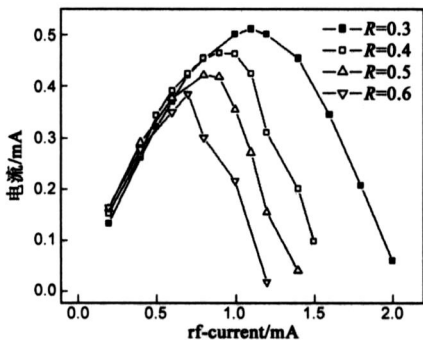


图5 取不同正常态电阻时的台阶高度-射频电流幅度曲线

图6给出的是取射频电流分别为 1mA 和 0.2mA 时绘制的台阶高度-正常态电阻曲线. 可以明显看出, 当射频电流为 1mA 时, 台阶的高度随着正常态电阻的增加而减小; 当射频电流为 0.2mA 时, 台阶的高度随着正

常态电阻的增加而增大. 这支持了前面的结论.

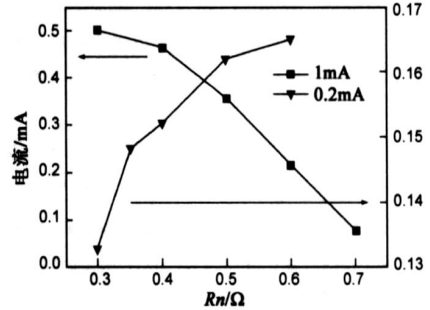


图6 射频电流幅度为 1mA 和 0.2mA 时的台阶高度-正常态电阻曲线

图7是在保持正常态电阻为 0.3Ω , 约瑟夫森结临界电流取不同值 (分别为 $0.4\text{mA}, 0.5\text{mA}$ 和 0.6mA) 时得到的台阶高度-射频电流幅度曲线. 可以看出, 在所取值范围内, 临界电流越大, 曲线所对应的台阶高度也越大.

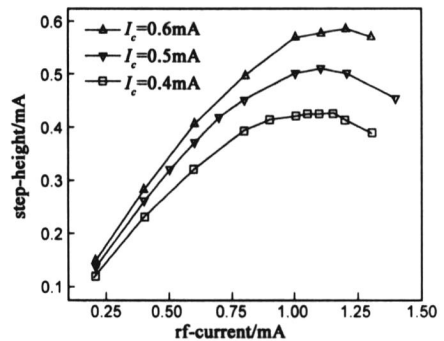


图7 在正常态电阻为 0.3Ω , 临界电流取不同值时的台阶高度-射频电流幅度曲线

4 结论

通过电路仿真的方法, 我们研究了约瑟夫森结 RCSJ 模型在射频辐射下的 Shapiro 台阶, 得出了约瑟夫森结的正常态电阻越小, 得到的台阶高度的最大值越大, 其所对应的射频电流值也越大. 因此当射频电流较小时, 我们选用较大的正常态电阻, 以得到最稳定的台阶高度. 而当射频电流可以任意大时, 我们应选用较小的电阻以达到最佳的效果. 因此结论对 Shapiro 台阶的应用有重要的参考价值.

参考文献:

[1] 王颖, 等. 约瑟夫森结跳变电流统计分布测量系统[J]. 电子学报, 2007, 35(5): 823- 826.
Wang Ying, et al. The measurement system of statistical distribution of the switching current of a single josephson junction [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(5): 823- 826. (in Chinese)
[2] Winkler D. Superconducting analogue electronics for research and industry[J]. Supercond Sci Technol, 2003, 16(11): 1583- 1590.

- [3] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2002, 50(3): 910– 927.
- [4] Shapiro S. Josephson currents in superconducting tunneling: The effect of microwaves and other observations[J]. Phys Rev Lett, 1963, 11(2): 80– 85.
- [5] Levinsen M T, et al. An inverse ac Josephson effect voltage standard[J]. Appl Phys Lett, 1977, 31(11): 776– 778.
- [6] Klushin A M, He M, Yan S L, et al. Arrays of high Tc Josephson junctions in open millimeter wave resonators[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(12): 232505 1– 3.
- [7] McCumber D E. Tunneling and weak link superconductor phenomena having potential device application[J]. J Appl Phys, 1968, 39(5): 2503– 2508.
- [8] Stewart W C. Current voltage characteristics of Josephson junctions[J]. Appl Phys Lett, 1968, 12(8): 277– 279.
- [9] Ya Ting Hu, Tie Ge Zhou, Sha Lin Yan, Lan Fang, Jing Gu, Xin Jie Zhao. Subharmonic steps and chaotic behavior in rf biased Josephson junctions[J]. Physica C, 2008, 468(3): 214– 217.
- [10] 李文全, 安海忠, 刘守会. Pspice 模拟 RF SQUID 器件的方法[J]. 电子学报, 1998, 26(5): 7– 11.

Li Werr Quan, et al. RF SQUID simulation with PSpice[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(5): 7– 11. (in Chinese)

作者简介:



刘飞连 女, 学生, 1988 年出生, 研究方向为约瑟夫森结的特性及应用.
E-mail: lffresh@yahoo.com.cn



周铁戈 男, 博士, 讲师, 1980 年出生, 2007 年博士毕业于南开大学电子信息科学与技术系并留校任教, 研究方向为超导电子技术、非线性电路和混沌保密通信等.