

基于电阻焦耳热调控 3D 纳米桥结的临界电流^{*}

吴丽丽^{1,2}, 汤演^{1,2}, 张登辉^{1,2}, 陈垒^{1,2†}, 王镇^{1,2}

1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 超导电子学卓越创新中心, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050

2. 中国科学院大学, 北京 100049

收稿日期: 2020-04-07; 接收日期: 2020-06-11

【摘要】 近些年来, 超导三端子器件通过引入第三端可控变量可以实现单个约瑟夫森结两端临界电流的调控, 受到广泛关注. 本文介绍了一种微缩型的超导三端子器件结构, 通过电阻电流产生的焦耳热来调节 3D 纳米桥结附近的局部温度, 从而实现有效调节 3D 纳米桥结的临界电流. 本实验利用了两种氩(Ar)离子表面清洗条件制备获得了两种不同电阻特性的铝(Al)电阻条, 并且测量表征了这两种电阻条的电流焦耳功率分别与单个和两个 3D 纳米桥结的临界电流之间的变化关系. 我们实现了最低使用 $33 \mu\text{W}$ 的电阻功率, 来达到单个 3D 纳米桥结的临界电流的 50% 范围内的调节, 从而验证了本超导三端子器件结构的可实用性.

关键词: 超导三端子器件, 3D 纳米桥结, 临界电流, 焦耳热

PACS: 85.25.Cp

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.03.003

Tuning of Critical Current of 3D Nb Nano-bridge Junctions by the Joule Heating Effect

WU Lili^{1,2}, TANG Yan^{1,2}, ZHANG Denghui^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, WANG Zhen^{1,2}

1. State Key Laboratory of Functional Materials for Information, Center for Excellence in Superconducting Electronics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai, 200050, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Received date: 2019-04-07; accepted date: 2019-06-11

【Abstract】 Recently, tuning the critical current of Josephson junctions to develop a three-terminal superconducting device draws wide attention. Here, we demonstrate a miniaturized three-terminal device that consists of a 3D nano-bridge junction and a resistor. We employ the Joule heating effect to adjust the local temperature of the junction, in order to tune the critical current of single nano-bridge junction. We compared the different clean conditions in the fabrication of the aluminum resistor and characterized the influence of Joule heating on the critical current of single and two 3D nano-bridge junctions, respectively. The result shows at least $33 \mu\text{W}$ resistor power can achieve 50% tuning of the critical current. Our initial study indicates that the structure is promising for future three-terminal superconducting devices.

Keywords: Superconducting three-terminal device, 3D Nano-bridge junctions, Critical current, Joule heating

^{*} 国家重点研发计划(批准号:2017YFF0206105)、中科院院前沿科学重点项目(批准号:QYZDY-SSW-JSC033)、中科院先导 A 项目(批准号:XDA18000000)和国家自然科学基金重大仪器项目(批准号:11827805)资助的课题.

[†] leichen@mail.sim.ac.cn

PACS: 85.25.Cp

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.03.003

Reference method: WU Lili, TANG Yan, ZHANG Denghui, CHEN Lei, WANG Zhen, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0136 (2020)

1 引言

自从1962年, B. D Josephson 预言了约瑟夫森效应^[1]之后, 以此理论为基础, 衍生出了多种超导约瑟夫森两端结构, 并在磁探测^[2]、量子计算^[3]以及超导数字电路^[4]中得到了广泛应用. 然而这种两端子器件由于缺乏第三端的调控, 在实际应用中面临了信号处理复杂和集成度低等一系列的问题. 因此研究者提出了多种三端子的超导器件结构, 比如将半导体材料^[5]或者铁磁材料^[6]结合到超导约瑟夫森结中, 分别通过外界电场或者磁场来达到调控约瑟夫森结临界电流的目的. 然而, 目前这类器件的制备工艺复杂, 并且它们的临界电流和临界温度都难以提升到实用范围. 另外, 科学家还提出了用局部的焦耳热来有效控制超导纳米线临界电流^[7], 但是这种超导纳米线不具备明显的约瑟夫森效应. 本文提出了一种新的超导三端子器件结构——利用电阻条的电流焦耳热来改变3D纳米桥结^[8] (Nano-Bridge Junction, NBJ) 结区附近温度, 从而控制3D纳米桥结的临界电流. 这里的3D NBJ采用传统的超导铌(Nb)材料制备而成, 具有良好的约瑟夫森非线性效应, 通常结区面积在几十纳米量级, 有利于高度集成. 图1显示了NBJ的临界电流随环境温度的变化情况^[9], 当温度从4.2 K升高约1 K左右时, 临界电流就减少到了4.2 K的50%左右, 因此通过控制NBJ环境温度可以有效调节它的临界电流. 本文基于3D NBJ的这种温度特性, 介绍了一种临界电流可调控的微缩型超导三端结构. 我们在结区附近制备了一个Al电阻条, 通过改变制备Al电阻条时的清洗条件, 我们获得了两种电阻特性不同的Al电阻条. 然后对比表征了两种Al电阻条产生的焦耳热与NBJ的临界电流的变化关系, 从而分析讨论了影响电流焦耳热控制NBJ临界电流的相关因素.

2 实验方法

在器件工艺工程中, 3D NBJ的制备方法可参

考文献[8-9], 我们在完成器件的Nb连线层和3D NBJ的电子束光刻和刻蚀工艺后再生长200 nm厚的Al薄膜, 然后采用剥离工艺得到Al电阻条, 该制备方法避免了Al薄膜与显影液发生反应. 如图2所示黄色区域为剥离工艺后的Al电阻图形. 通常在Nb薄膜表面存在约5 nm厚的氧化铌层, 实验中我们利用物理刻蚀的方法来清洗表面, 从而改变电阻层和Nb连线层的界面接触. 我们在实验中制备了两个样品组, 分别选择了Ar等离子体(Plasma)刻蚀和Ar离子束(Ion beam)刻蚀的两种表面清洗方式, 来对比Al电阻条的制备效果. 实验中的刻蚀条件如表1所示. 因为光刻胶对plasma刻蚀的耐刻蚀性比较弱, 所以为了保证剩余的光刻胶可以顺利进行剥离, plasma刻蚀时间选为60 s. 同时, Ar离子束刻蚀对光刻胶的损伤相对较小, 刻蚀时间选取为4 min.

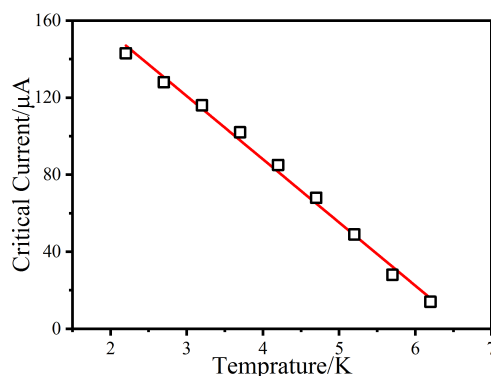


图1 NBJ 临界电流随环境温度的变化曲线

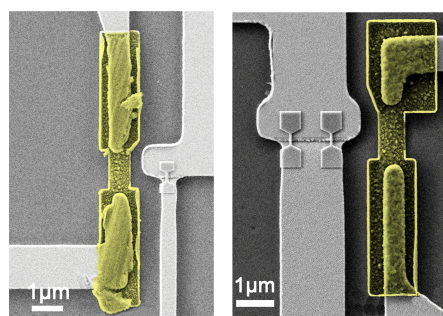


图2 3D 纳米桥结和 Al 电阻条的 SEM 图

表 1 两种清洗刻蚀方法的条件

样品组	刻蚀方法	刻蚀条件				
		功率	气压	流量	时间	
1	Plasma	70 W	5 Pa	30sccm	60 s	
2	Ion beam	离子能量	加速电压	功率	离子束流量	时间
		400 eV	400 V	500 W	5sccm	4 min

在样品组 1 和样品组 2 中,我们均制备了单个 NBJ 和两个 NBJ 并联的器件,并且进行了 NBJ 的临界电流与电阻条的焦耳热之间的关系曲线的测量.所有器件的电学测试均采用液氮浸泡的方法降温至 4.2 K 后进行. NBJ 的临界电流随电阻偏置电流 I_R 的变化是采用经典四端电流电压测量方法进行测量的,测量电路如图 3 所示.

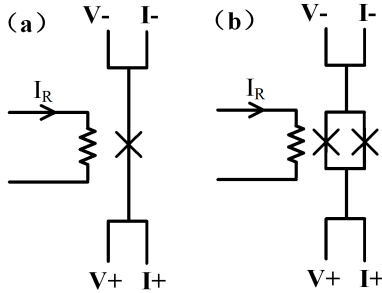


图 3 (a)单个结和(b)两个结器件的测量电路示意图

3 结果与讨论

图 4(a)和(b)分别为样品组 1 和样品组 2 中 Al 电阻的 $R-T$ 曲线和在 4.2 K 温度下的电阻值随偏置电流的变化曲线.从图中可以看出,样品组 1 采用 plasma 清洗刻蚀的方式得到的电阻为非线性电阻,且具有电阻随温度下降而增加的负温度系数.这说明 Nb 膜表面在 plasma 刻蚀后,仅去除了表面部分氧化物,仍然保留了一层非常薄的氧化铌膜.而在采用 Ar 离子束进行清洗刻蚀的样品组 2,对 Nb 表面进行了约 10 nm 的刻蚀清洗,第二层 Nb 膜与 Al 膜间形成了良好的界面接触,因此制备出的 Al 电阻为线性电阻且具有正的温度系数.

在样品组 1 和样品组 2 中,我们各选取了三个器件(2 个单结和 1 个双结),并且表征测量了它们的临界电流随电阻偏置电流的变化曲线,图 5 显示了其中两个典型器件的测量结果.当在无电阻焦耳热作用下,即 $I_R = 0$ 时, NBJ 的临界电流最大.随着电阻偏置电流 I_R 的逐渐增大,电阻产生的热量扩散至结区,使其温度逐渐升高,导致 NBJ 的临界电流开始减小.当电流 I_R 较小时,由于电阻的发热功率小于液氮冷却功率,电阻产生的热量迅速消散,无法引起结区温度的变化.随着电流 I_R 继续增大,临界电流逐渐减小并开始出现一些小幅度的锯齿状波动,这可能是由于测量临界电流时,扩散至结区的热量不稳定,还未在结区达到热平衡,导致温度波动的出现.

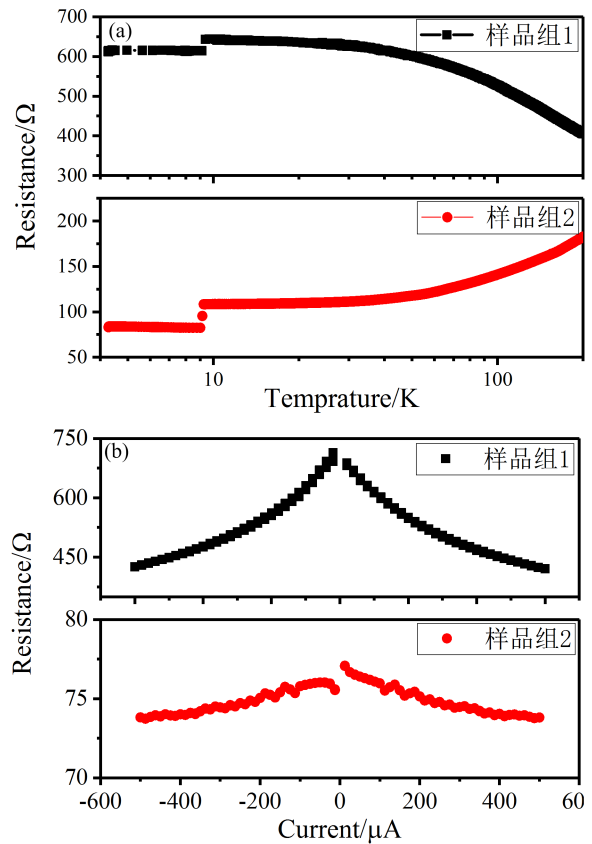


图 4 样品组 1 和样品组 2 中的 Al 电阻随(a)温度和(b)偏置电流的变化曲线

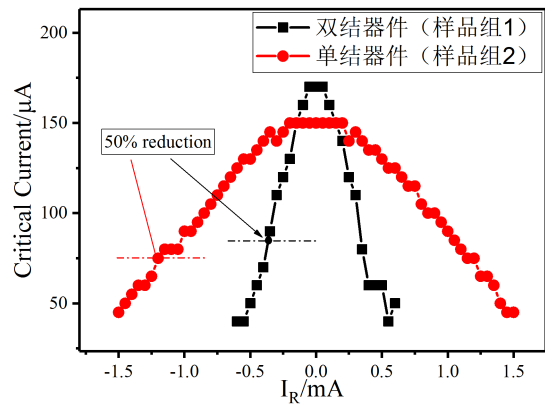


图 5 NBJ 临界电流随电阻偏置电流的变化曲线

根据焦耳定律,电流产生的热量为 $Q = I_R^2 R t$.在测试过程中,我们通过测量 NBJ 的 $I-V$ 曲线来得到临界电流,而测量中所设定的 $I-V$ 曲线扫描速度非常慢,电阻加热和液氮冷却基本达到一个热平衡状态,温度不再随时间而发生变化,那么电阻焦耳热的影响就可以利用电阻的功率 $P = I_R^2 R$ 来间接表示.本文选取当临界电流减少至最大临界电流一半时的电阻功率 $P_{50\%}$ 来表征电阻焦耳热对 NBJ 的临

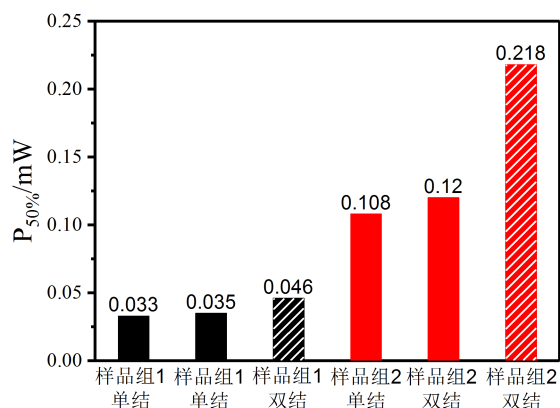


图6 样品组1和样品组2实现50%临界电流调节所对应的电阻功率

界电流的影响. 如图6所示, 相比于样品组2的线性电阻器件, 样品组1的非线性电阻器件所需的 $P_{50\%}$ 均较小, 主要是因为样品组1中存在氧化层, 其导热性较差, 更利于局部热量的积累, 从而对应 NBJ 结区升高相同温度所需的电阻功率更低. 同时, 我们可以看到相比于单结器件, 双桥结器件所需的 $P_{50\%}$ 较高. 这主要是由于两个桥结距离电阻的平均距离更远, 因此需要更多的热量扩散至两个结更大的区域

来实现50%临界电流的调节. 由实验结果可以看出, 电阻条的焦耳热可以有效控制结区的局部温度从而实现3D NBJ的临界电流的调控, 其中最低 $33 \mu\text{W}$ 的电阻功率即可实现单个3D NBJ的临界电流50%的减少.

4 结 论

本文介绍了一种通过电阻电流焦耳热来调节3D纳米桥结临界电流的方法. 这种方法不但可以大幅度调节NBJ的临界电流, 而且制备方法简单, 可以用于实现微缩型的超导三端子器件. 目前, 我们实现50%临界电流调节范围所需要的电阻功率最小约为 $33 \mu\text{W}$, 实验表明通过优化电阻条与外界导热性, 能够进一步减小所需的电阻功率. 同时, 电阻与结区的热耦合距离越近, 需要的电阻功率也会越小. 因此, 在将来的实验中使用氮化铝这样导热好的绝缘层材料, 同时将电阻与纳米桥结设计成上下垂直结构, 器件的功耗和面积将进一步减小. 此外, 还可以选用钼(Mo)、钯(Pd)等可刻蚀加工的材料制备电阻条, 提高工艺稳定性.

参 考 文 献

- [1] B. D. Josephson, Phys. Lett., **1** (1962), 251
- [2] C. Granata, A. Vettoliere, Phys. Rep., **614** (2015), 1
- [3] T. P. Orlando, L. Tian, D. S. Crankshaw, S. Lloyd, C. H. van der Wal, J. E. Mooij, F. Wilhelm, Phys. C: Supercond., **368** (2002), 294
- [4] K. K. Likharev, V. K. Semenov, IEEE Trans. on Appl. Supercond., **1** (1991), 3
- [5] T. Akazaki, H. Takayanagi, J. Nitta, T. Enoki, Appl. Phys. Lett., **68** (1996), 418
- [6] I. P. Nevirkovets, S. E. Shafraniuk, O. A. Mukhanov, IEEE Trans. on Appl. Supercond., **28** (2018), 1
- [7] A. N. McCaughan, K. K. Berggren, Nano Lett., **14** (2014), 5748
- [8] L. Chen, H. Wang, L. Wu, Z. Wang, Nano Lett., **16** (2016), 7726
- [9] 汪浩 2018 博士学位论文(北京:中国科学院大学)