单电子晶体管的制备与表征*

吴小宇[1]，赵虎[2]，李智[1†]

1. 四川大学电子信息学院 成都 610065；

2. 航空工业西安飞行自动控制研究所，西安 710065

收稿日期：2020-03-29；接收日期：2020-06-10

【摘要】 单电子晶体管是一种非常重要的器件，在量子计算、电荷探测领域具有重要应用. 由于其尺寸极小，很容易受到静电的影响导致损坏，并且对于测试条件要求苛刻，制备与观测较为困难. 本文用双角度蒸发的方法制备了SET，在稀释制冷机的 10 mK 极低温度下，对 SET 的基本性能进行了测试和表征. 针对制备、运输、测试以及安装的全流程提出了一整套静电防护方案.

关键词：单电子晶体管，双角度蒸发，约瑟夫森结，静电防护

PACS： 03. 67. Lx，85. 25. Cp

DOI： 10. 13380/j. ltpl. 2020. 02. 006

The Fabrication and Measurement of Single Electron Transistor

WU Xiaoyu[1]，ZHAO Hu[2]，LI Zhi[1†]

1. *College of electronics and information engineering，Sichuan University，Chengdu*，610065；

2. *AVIC Xi'an automatic control research institute，Xi'an*，710065

Received date：2020-03-29；accepted date：2020-06-10

【Abstract】 Single electron transistor(SET) is a very important device，which has an important application in the field of quantum computation and charge detection. Because of its small size，it is easy to be damaged by static electricity，and the test conditions are very demanding，so it is difficult to fabricate and observe. In this paper，the SET is fabricated by two angle evaporation. The basic properties of the SET are tested and characterized at the extremely low temperature of 10 mK in dilution refrigerator. For the whole process of fabrication，transportation，testing and installation，a set of electrostatic protection scheme is proposed.

Keywords：SET，two angle evaporation，Josephson junction，Electrostatic protection

PACS： 03. 67. Lx，85. 25. Cp

DOI： 10. 13380/j. ltpl. 2020. 02. 006

Reference method：WU Xiaoyu，ZHAO Hu，LI Zhi，Low. Temp. Phys. Lett. **41**，0097 (2020)

* 国家重点基础研究发展计划(批准号：2011CBA00304)和国家自然科学基金重点项目(批准号：60836001)资助的课题.

† lizhi@scu. edu. cn

1 引　　言

单电子晶体管[1,2](Single Electron Transistor, SET)自 1947 年被发明以来,一直朝着小体积和快速开关的方向发展[3,4],SET 基于库伦阻塞效应[5,6],即当库伦岛[7,8]的体积很小时,其充电能 $e^2/2C$ 与一个电子热运动的能量 kT 相当,k 为玻尔兹曼常数,T 为绝对温度. 一旦有一个电子通过隧穿进入库伦岛,它将会阻止后面的电子继续进入库伦岛,通过调节库伦岛的势能,从而可以控制单个电子的进出. SET 可用于制作存储器[5,6],制作超高灵敏度的静电计[7-9],也可用于超导电荷量子比特的测量[10-12]等.

2 单电子晶体管的工作原理

SET 由两个尺寸极小的约瑟夫森结(~50 nm)、库伦岛和栅极构成,如图 1 所示. 设栅极电容为 C_g ,两个约瑟夫森结的结电容分别为 C_1 和 C_2,栅极电压为 V_g ,偏置电压为 V_b .

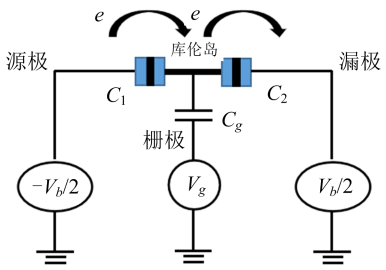


图 1　单电子晶体管原理图

Fig. 1　Schematic diagram of SET

则系统的总电容可表示为:

$$C = C_1 + C_2 + C_g \tag{1}$$

库伦岛电荷 Q 的静电能 E 为:

$$E = -QV_g + Q^2/2C \tag{2}$$

栅极电压吸引来的电荷 $Q_0 = CV_g$,将其带入(2)式得到静电能:

$$E = (Q - Q_0)^2/2C \tag{3}$$

其中,电荷 Q 的数值只能取电子电量 e 的整数倍,改变 V_g ,使得 $Q_0 = Ne$,此时静电能取最小值. 改变 V_g ,使得 $Q_0 = (N+1/2)e$,此时 $Q = Ne$ 和 $Q = (N+1)e$ 的最小能量是简并的,即从源极进入库伦岛的电子不需要越过 $e^2/2C$ 的势垒. 对约瑟夫森结来说,当结面积较大时,充电能 $E_C = e^2/2C$ 较小,当结面积较小时,充电能 E_C 较大[12],SET 所需要的充电能较大,因此需要面积很小的结,一般通过电子束曝光[13]工艺制作,结尺寸一般小于 50 nm. SET 在正常工作时,必须满足 $kT < e^2/2C$,即充电能大于电子热运动能量,另外,其总电阻 R 还应满足大于量子电阻 $R_k \approx 26$ kΩ 的要求,避免量子涨落[14]对 SET 工作造成的影响.

3 SET 的制备

SET 的构成器件为约瑟夫森结,约瑟夫森结由两块超导体夹着一层很薄的绝缘层构成,双角度蒸发[15]的方法是得到约瑟夫森结的一种重要方法. 为了使约瑟夫森结的实际尺寸与设计尺寸相同,应对双角度蒸发的角度及参数进行建模计算. 双角度蒸发的计算模型如图 2 所示,其中 h、H 分别为上下层电子束胶的厚度,W 为悬空部分的宽度,X 为约瑟夫森结的横向设计尺寸,M 为电子束上层胶的开孔宽度.

根据几何关系可以列出方程:

$$M - X = h\tan\theta \tag{4}$$

$$W + 2X + 2h\tan\theta = X + 2(h + H)\tan\theta \tag{5}$$

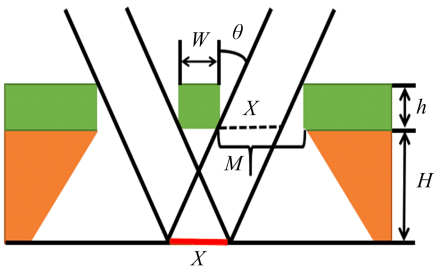


图 2　双角度蒸发示意图

Fig. 2　Schematic diagram of two angle evaporation

根据以上两个方程,在给定胶厚度 h 与 H,以及蒸发角度 θ 的情况下,可以设计任意尺寸的约瑟夫森结. 双角度蒸发一般有两种典型的版图设计方法,它们的设计参数略有差别,其中一个方法需要三个设计参数,另一个方法只需要两个设计参数. 它们的版图及蒸发得到的约瑟夫森结的 SEM 图如图 3(a)、(b)所示.

由于 SET 的库伦岛较小,因此选用三参数蒸发方法. 铝是一种较为常见的单质超导体,制备工艺较为成熟,因此选用铝作为 SET 的制备材料简单易行. SET 中的约瑟夫森结尺寸约为 50 nm,制备时

需要用到电子束曝光工艺，以及双角度蒸发工艺，SET 的简要制备工艺如图 4 所示. 为了形成 undercut 结构，需要在硅片上依次甩两层胶，上层胶为 ZEP520-A7，厚度为 300 nm，下层胶为 Copolymer (MMA/MAA) EL11，厚度为 600 nm. 这两种胶可用不同的显影液进行显影，因此 undercut 的尺寸可以灵活控制. 首先进行一个角度蒸发第一层铝膜，厚度为 30 nm，为了保证铝膜的均匀性和质量，蒸发速率保持在 0.2 nm/s，接下来进行氧化，氧化层的厚度是决定约瑟夫森结特性的关键参数，为了能够精准的控制氧化层的厚度，选用氩气和氧气的体积比为 9∶1 进行氧化，氧化时间为 20 mins，混合气体的压力为 60 mTorr.

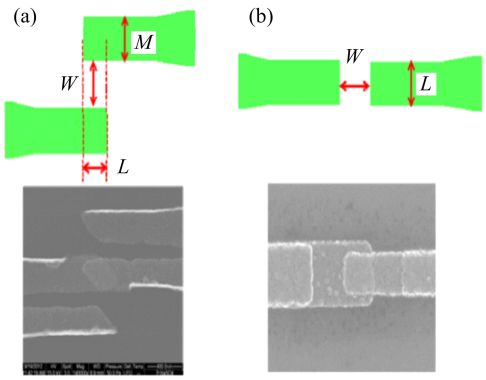


图 3 (a)三参数蒸发版图及 SEM 图
(b)两参数蒸发版图及 SEM 图

Fig. 3 (a) Three parameter evaporation layout and SEM picture
(b) Two parameter evaporation layout and SEM picture

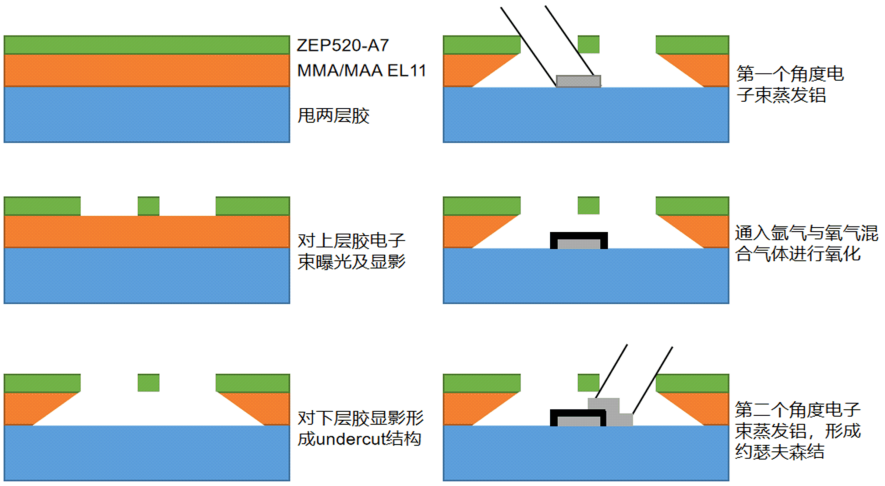


图 4 SET 的制备工艺

Fig. 4 Fabrication process of SET

最后，进行第二个角度的蒸发，厚度为 50 nm. 制备好的 SEM 图如图 5 所示.

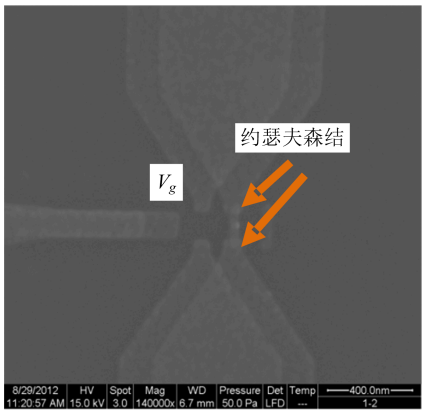


图 5 SET 的 SEM 图

Fig. 5 The SEM picture of SET

图 5 中很明显可以看出双角度蒸发的痕迹，图中的左侧为栅极 V_g，箭头所指出的部分为两个约为 50 nm 的约瑟夫森结.

4 单电子晶体管的测试与表征

SET 的测试必须在超低温下进行，获得超低温的仪器为 BlueFors BF-LD400 稀释制冷机. 如图 6 所示.

该稀释制冷机是一台全自动的干式制冷机(dry fridge)，最低温度为 10 mK. 一共有 5 级，第一级为 50 K，最后一级为 10 mK. 为了测试的方便，在 10 mK 级制作了一款无氧铜镀金板，用于安装样品.

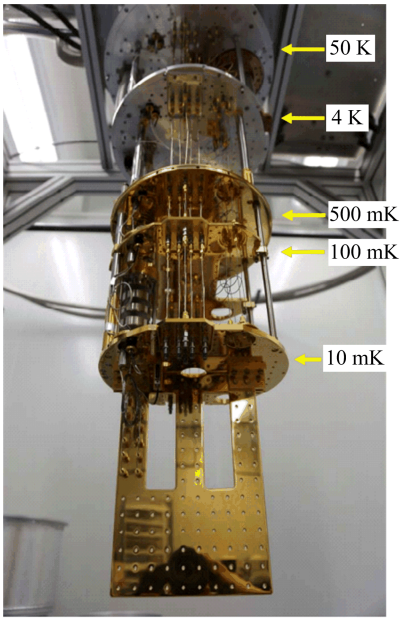


图 6　稀释制冷机内芯

Fig. 6　Dilution refrigerator inner core

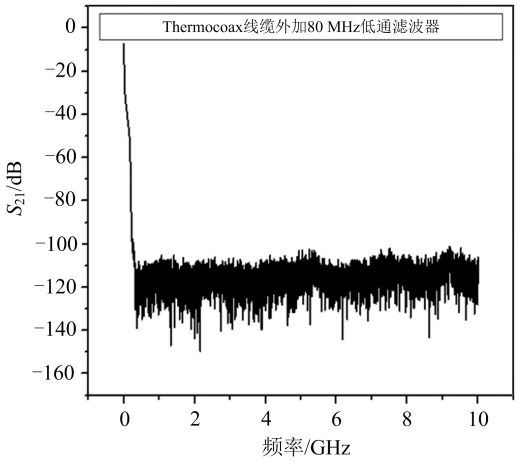


图 7　Thermocoax 直流线与 80MHz 低通滤波器串联的 S_{21} 特性

Fig. 7　S_{21} characteristics of Thermocoax DC line in series with 80MHz low pass filter

该测试系统包含 24 路滤波效果非常好的 Thermocoax 直流线和 16 路截止频率为 20 GHz 的微波线，SET 就是用带滤波器的直流线进行测试，其线路的滤波特性如图 7 所示. 从图 7 可以看出，该线缆与 80 MHz 低通滤波器串联后的滤波效果非常好，高频具有超过-110 dB 的衰减，这为 SET 的测试表征创造了非常好的电气环境.

SET 的测试线路如图 8 所示，电源为 Yokogawa 7651，工作在恒压模式下，SET 的电压经过放大器 SRS560 放大 100 倍，用 Agilent 34401A 进行采集，SET 的电流通过测量串联在电路中的 500 kΩ电阻电压得到.

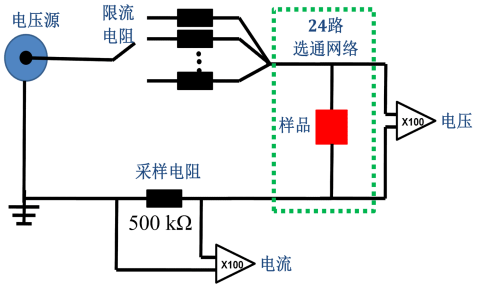


图 8　SET 的测试线路

Fig. 8　Test circuit of SET

当制冷机的最低温度达到 10 mK 时，对 SET 进行了测试表征，在不同的 V_g 下，对 V_b 进行扫描，得到如图 9 所示的测试结果. 由于 SET 所需要的 V_b 非常小，而电源直接给出比较小的电压值，噪声误差较大，因此采用串联电阻分压的方式得到较高信噪比的 V_b. 当 SET 的 V_b 不同时，其电阻有所不同，所以 SET 得到的分压与 V_b 有关系，造成图中的库伦区域有一定的斜率.

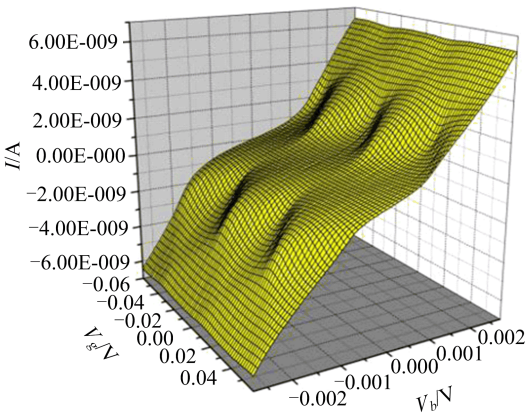


图 9　SET 的测试结果

Fig. 9　Test result of SET

如图 9 所示，X 轴、Y 轴与 Z 轴分别对应 SET 的 V_g(V)、V_b(V)与电流 I(A). 可以看出，V_g 固定时，观察 V_b-I 曲线，可以明显看到库伦阻塞效应，当 V_g 变化时，由于周期性的改变了库伦岛上的电势能，使得库伦阻塞的区域发生周期性的变化.

5　静电防护

SET 是非常脆弱的器件，极易受到静电的影响

导致器件被击穿，因此在 SET 的制备、划片、运输、测试以及安装过程中都需要注意静电防护问题，具体罗列如下：

(1)SET 制作好后，不要立即进行去胶剥离，而应先划片，因为电子束蒸发后，整个硅片的表面都有一层铝覆盖，这能够非常有效的防止静电在局部放电而破坏约瑟夫森结.

(2)由于 SET 的约瑟夫森结室温电阻一般在几千欧姆，所以可用探针台进行两端法测试. 实际的测试电路如图 10 所示.

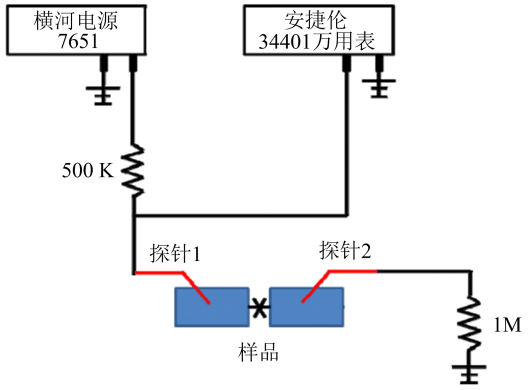


图 10　SET 探针测试示意图

Fig. 10　SET probe test diagram

测试时应采用电压源模式，通过串联 500 kΩ 限流电阻得到小电流进行测试，测试时的电压一般不超过 5 mV，保证通过样品的电流不超过 10 nA. 设想如果用电流源模式进行测量，电流源模式的内阻为无穷大，如果探针和样品接触不好，很容易造成输出电流过大，从而击穿约瑟夫森结. 测试时最好先将接地端的探针扎到 SET 的电极上，保证样品接地.

整个室温测试平台以及测试仪器都需要共地，并且连接大地，如图 10 所示，这里的接地通过串联一个 1 MΩ的电阻到大地，也能够起到限流作用. 测试人员必须佩戴接地手环.

(3)样品在运输过程中应放置在带自吸附的防静电样品盒中，并且在外部用铝箔包裹，这种样品盒的外壳是导电的，与铝箔一起可以构成一个小范围的“地”，对于移动过程中产生的静电积累可以有效的释放.

(4)在引线键合的过程中，必须将引线键合机器的针尖、人体以及样品盒都接到工艺线的大地上，才能够避免静电击穿.

(5)安装样品时一定要佩戴防静电手环，并且要将手环与制冷机的外壳以及实验室的大地接到一起.

注意了以上五处问题，能够保证 SET 的样品是完好的，才能够进行低温下的测试.

6　结　　论

基于约瑟夫森结的 SET 是一类重要的量子器件，在电荷探测、量子计算领域都具有重要应用. 本文介绍了 SET 的基本原理，通过双角度蒸发的方法制备了 SET，并在稀释制冷机提供的超低温环境 10mK 下进行了测试和表征. 针对 SET 在制备、金丝键合、探针测试、运输过程中容易出现的静电损坏问题，提出了一整套防护措施. 该防护方法可推广用于任何容易受静电影响的器件.

致谢：

感谢日本 NEC 基础创新实验室 Tsai J S 提供的样品加工支持.

参　考　文　献

[1] Kastner M. *Review of Modern Physics*., **64**(1992), 3.

[2] G. D. Goldhaber, H. Shtrikman, D. Mahalu, et al. *Nature*, **71**(1998), 16.

[3] Z. Lei, J. G. Ling, Y. C. Stephen, *Appl. Phys. Lett.*, **72**(1998) 10.

[4] J. M. Hergenrother , J. G. Lu, M. T. Tuominen, et al., *Phy. Rev. B*, **51**(1995) 14.

[5] D. V. Averin, K. K. Likharev, *Journal of Low Temperature Physics*, **62**(1986) 3.

[6] D. V. Averin, *Fortschritte Der Physik*, **48**(2000) 9.

[7] Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, J. S. Tsai, *Nature*, **398**(1999) 786.

[8] Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, T. Yamamoto, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **88**(2002) 4.

[9] L. Guo, *Science*, **275**(1997) 5300.

[10] K. Uchida, J. Koga, R. Ohba, et al., *IEEE Transactions on Electron Devices*, **50**(2003)7.

[11] R. J. Schoelkopf, *Science*, **280**(1998) 5367.

[12] H. Zhao, T. F. Li, J. S. Liu, et al., *Acta Physica Sinica*, **61**(2012) 15.

[13] Y. Y. Wei, J. Weis, K. V. Klitzing, et al., *Physica B Condensed Matter*, **249**(1998)6.

[14] K. Nishiguchi, C. Koechlin, Y. Ono, et al., *Japanese Journal of Applied Physics* **47**(2008)11.

[15] J. Y. Luo, H. J. Jiao, J Wang, et al., *Phys. Lett. A*, **374** (2010)48.

[16] Y. Ye, J. Ping, H. J. Jiao, et al., *International Journal of Theoretical Physics*, **51**(2012) 2.

[17] J. Koch, V. Manucharyan, M. H. Devoret, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **10**(2009) 21.

[18] B. C. Wang, G. Cao, H. O. Li, et al., *Phys. Rev. Appl.*, **8**(2017)6.

[19] S. H. Pereira, M. E. S. Alves, T. M. Guimarães, *European Physical Journal C*, **79**(2019) 6.

[20] G. Oelsner, U. Hübner, S. Anders, et al., *Low Temperature Physics*, **43**(2017) 7.