

超导量子比特中铝超导隧道结的性能

沈丹丹, 朱冉, 许伟伟*, 常俊杰, 吉争鸣, 孙国柱, 曹春海, 陈健

南京大学电子科学与工程学院, 超导电子学研究所, 南京 210093

* 联系人, E-mail: ww Xu@nju.edu.cn

2011-03-18 收稿, 2011-09-20 接受

国家重点基础研究发展计划(2011CBA00107, 2009CB929602)、国家自然科学基金(10874074, 61027008)和教育部博士基金(200802840031)资助项目

摘要 超导隧道结约瑟夫森结是超导量子比特的基本元件. 用双层光刻胶构成悬空掩模, 用电子束斜蒸发的方法制备 Al/Al₂O₃/Al 隧道结, 用一定的氧气气压氧化铝膜作为势垒层. 势垒层质量直接影响铝超导隧道结的各项电学参数. 深入研究了铝超导隧道结的超导临界电流密度 J_c 和面积归一化电阻 R_c (正常态电阻 R_N 与结面积的乘积) 与势垒层生长条件的关系, 通过改变势垒层生长的氧分压与氧化时间来控制铝超导隧道结的 J_c 和 R_c , 以使此工艺所制备的铝隧道结漏电流小, 结参数易于控制, 满足制备超导量子比特的要求.

关键词

Al/Al₂O₃/Al 超导
隧道结
电子束蒸发
超导量子比特

近年来, 对超导器件的研究在国内引起了越来越广泛的关注, 主要研究集中在超导约瑟夫森结^[1]、滤波器^[2-5]、单光子探测器^[6]和热电子测辐射计(HEB)^[7]等器件的制备和应用. 其中一个重要的方面是应用于超导量子比特的超导约瑟夫森结和超导量子干涉器件(SQUID)^[8-12]的研究. 量子计算作为一种新型的计算体系, 已经证明具有超越传统计算机的优越性能. 在处理如大数分解等经典计算机难以完成的任务时, 量子计算的速度会有指数级的增长. 因此对如何实现量子计算的研究引起了很多关注. 超导量子计算方案具有制备工艺成熟, 便于规模化等优势, 并且在基本原理上完全可行. 近几年来超导量子比特提出后, 发展非常迅猛^[13-16], 超导量子计算已经成为各种量子计算方案中发展最快, 可集成性最好, 潜力最大的方案之一. 利用包含单个或两个超导约瑟夫森结的超导环可以制备 SQUID, 与一个超导结一起实现超导磁通量子比特^[16-19]. 超导约瑟夫森结是实现超导量子比特的核心元件.

与 IN, Sn, Pb, NbN 等超导材料相比, 铝具有较纯的超导态, 和相对较低的转变温度(T_c 为 1.2 K), 是制备约瑟夫森结常用的材料^[20]; 铝的相干时间长^[21],

有利于实现量子计算的多元逻辑运算^[22]; 铝的熔点(660°C)远低于其他常见的超导材料(如 Ni 2477°C), 易于蒸发, 因此容易制备.

为了构建超导量子比特, 我们对制备超导隧道结的工艺与特性进行了深入研究. 采用悬空掩模-倾斜角度蒸发工艺^[23]来制备 Al/Al₂O₃/Al 超导隧道结. 此方法具有可以制备出小面积(如亚微米, 纳米级)的隧道结, 制备工艺简单, 制备出的结漏电流小等优点. 电子束蒸发具有良好的方向性, 因此可以被用来进行倾斜角度蒸发镀膜. 通过对势垒层工艺的研究我们获得了高性能的超导隧道结, 在温度 0.3 K 下, 漏电流与超流的比值为 0.5%, 完全满足超导量子比特电路的要求.

1 铝隧道结的制备

我们采用双层光刻胶来制备悬空掩模结构, 底层胶(LOR10B)作为支撑层, 上层胶(495PMMAC8)作为显影层. 用电子束倾斜角度蒸发来制备铝超导薄膜, 衬底基片可在 0°~90°范围内旋转. 在掩膜尺寸确定之后, 可以根据光刻胶的厚度以及斜蒸发角度调节结的大小. 实验中 Al₂O₃ 势垒层通过在第一层膜制备

后直接通入高纯氧气(99.99%)氧化铝薄膜表面来实现. 采用斜蒸发方法制备铝隧道结, 其优点为: 一是整个制备过程都在真空中完成, 有效地避免了二次污染, 从而减小了隧道结的漏电流; 二是可以通过调节两次斜蒸发的角度来进一步控制结面积的大小, 因此可以制备出更小的超导隧道结. 实验中当桥区宽度为我们成功制备出结区面积为 $1\sim 8\ \mu\text{m}^2$ 大小可调的铝隧道结, 如图 1 所示.

制备高质量的铝超导隧道结首先要制备表面平整的铝薄膜. 薄膜的表面平整度对势垒层质量的关系极大, 如果表面不平整容易造成势垒层漏洞, 导致结的漏电流增大. 电子束蒸发法控制灵活, 容易获得均匀膜层. 我们对不同成膜速率和不同厚度的膜进行了原子力显微镜(AFM)观测分析. 从表 1 和 2 中可以看出在 $7\sim 1\ \text{nm/s}$ 不同蒸发速率时表面粗糙度(RMS)变化不大, 而随着膜厚的增加表面粗糙度同步增加, 为了更好地控制薄膜生长, 我们选择膜厚 $100\ \text{nm}$, 速率 $0.2\ \text{nm/s}$. 所制备的铝膜在 $300\ \text{mK}$ 下的临界电流密度 J_c 为 $1\times 10^5\ \text{A/cm}^2$.

2 铝隧道结性能参数与势垒层控制

在隧道结的制备中势垒层的制备最为关键, 势垒层决定了超导临界电流密度 J_c , 势垒能隙电压 V_g , 漏电流 I_b 等重要参数. 例如, 势垒层太薄, 漏电流会增加; 势垒层太厚, 超导临界电流密度会变小, 这些都不能满足制备超导量子比特的要求. 为了得到满足量子比特所需参数的隧道结, 我们研究了铝隧道结参数特性与势垒层形成条件的关系. 首先用超导电流密度 J_c 和面积归一化电阻 R_c (正常态电阻 R_N 与结面积的乘积) 来表达隧道结参数^[24]. 势垒层的制备通

过在制备好铝膜后通进一定的氧气, 使铝膜表面形成 Al_2O_3 层, 通过改变氧分压与氧化时间这两个参量来改变 Al_2O_3 势垒层的致密程度与厚度, 从而对铝隧道结的特性参数 J_c 和 R_c 进行控制, 我们对不同氧化条件下所制备的铝隧道结参数进行了测量.

表 3 表示的是, 保持氧分压不变($25\ \text{Pa}$), 改变氧化时间的情况下, 制备出铝隧道结的参数比较. 从表中可以看到氧化时间从 $5\ \text{min}$ 增加到 $20\ \text{min}$, 超导临界电流密度与面积归一化电阻都没有明显的变化. 这表明在一定氧化时间范围内, 氧化时间的改变对势垒层没有明显的影响, 这是因为已形成的 Al_2O_3 层阻挡了新的 Al_2O_3 层的生长.

图 2 和 3 分别显示了铝隧道结的超导临界电流密度 J_c 和面积归一化电阻 R_c 的大小, 随制备势垒层时氧分压变化的关系. 从图 2 中可以看出, 在 $1\sim 50\ \text{Pa}$ 范围内, 铝隧道结的超导电流密度 J_c 的大小随氧分压的增大近似按指数关系直线变小. 从图 3 中可以看出, 在 $1\sim 50\ \text{Pa}$ 范围内, 铝隧道结的面积归一化电阻 R_c 随氧分压的增大近似按指数关系直线变大. 因此我们可以在此范围内按此直线关系, 通过调节势垒层制备过程中氧分压的大小, 来调节所制备的铝隧道结的参数, 以满足制备超导量子比特的要求. 从这两幅图中还可以看到, 随着氧化压强的进一步增大, 当大于 $50\ \text{Pa}$ 后, 铝隧道结的 R_c 和 J_c 随氧分压的变化不再是直线关系而逐渐变缓, 这表明作为势垒层的铝膜的氧化程度逐渐趋于平缓, 这可能是因为铝膜表面形成的致密氧化层减缓了氧分子与下层铝膜发生氧化的速度, 从而使铝隧道结的临界电流密度与特征电阻随氧分压增大的变化减慢. 综合表 1 和 2,

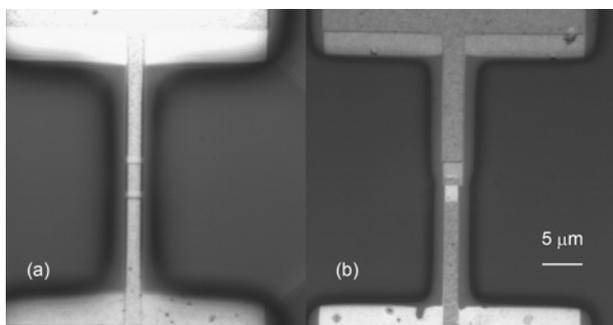


图 1 铝隧道结(交叠区)的光学图
结面积大小分别为 $1\ \mu\text{m}^2$ (样品(a))和 $8\ \mu\text{m}^2$ (样品(b))

表 1 蒸发速率为 $1\ \text{Å/s}$, 不同厚度薄膜的 RMS

薄膜厚度(nm)	表面粗糙度 RMS(nm)
50	2.469
100	4.33
220	8.71

表 2 薄膜厚度为 $100\ \text{nm}$, 不同蒸发速率制备薄膜的 RMS

薄膜厚度(nm)	表面粗糙度 RMS(nm)
7	4.833
3.5	4.487
0.8	4.33

表 3 氧分压不变, 改变氧化时间制备出铝隧道结的参数

样品	氧化时间(min)	$J_c(\text{A}/\text{cm}^2)$	$R_c(\Omega \mu\text{m}^2)$
1	5	30	800
2	5	40	1000
3	10	25	820
4	10	30	800
5	20	25	1000
6	20	30	800
7	20	14	1500

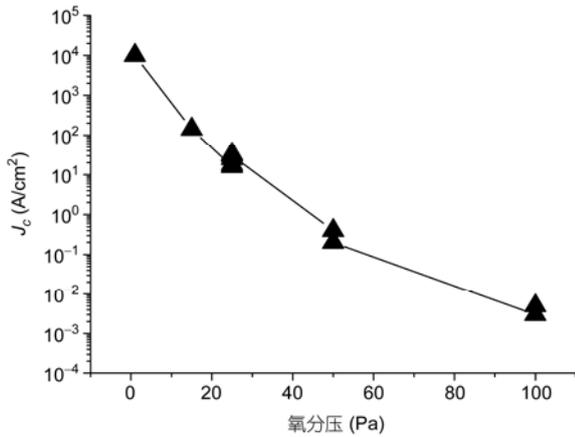


图 2 氧化时间为 20 min, 在不同的氧化压强下制备出的铝隧道结的超导临界电流密度 J_c 与氧化压强的关系

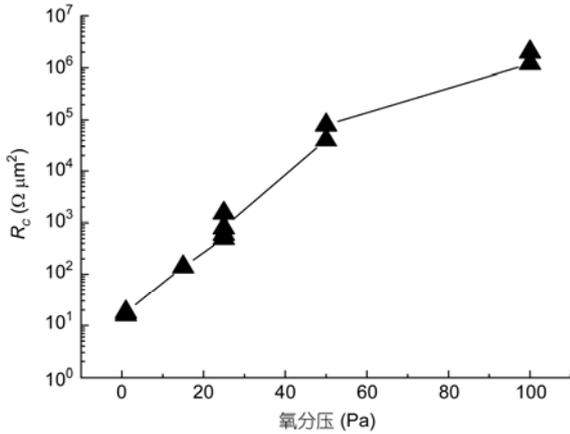


图 3 氧化时间为 20 min, 在不同的氧化压强下制备出的铝隧道结的面积归一化电阻 R_c 与氧化压强的关系

图 2 和 3 的结果, 可得到满足后续制备超导量子比特电路要求的铝隧道结的最佳制备条件为氧分压 20 Pa, 氧化时间 5~10 min.

3 铝隧道结与 DC-SQUID 特性

我们采用四端子法测量铝超导隧道结的 I - V 特性, 利用由牛津公司(OXFORD INSTRUMENTS)制造的型号为 PT403-2440301 的氦 3(He^3)制冷机系统, 测量温度能够达到 0.3 K, 该测量系统的测量精度, 电流和电压分别能够精确到 nA 级和 μV 级.

如图 4, Al 隧道结在 0.3 K 下的 I - V 曲线, 结的能隙电压 $V_g \approx 0.39 \text{ mV}$, 正常态电阻 $R_c \approx 500 \Omega$, 根据超导转变电流估算超导流 $I_c \approx 0.5 \mu\text{A}$, 超导电流密度 $J_c \approx 30 \text{ A}/\text{cm}^2$. 在 0.3 K 下, 漏电流约为 2.5 nA, 漏电流与超导临界电流的比值为 0.5%.

在前面工作的基础之上, 我们制备了并联双结器件形成 DC-SQUID(图 5). SQUID 环的面积为 $40 \mu\text{m}^2$

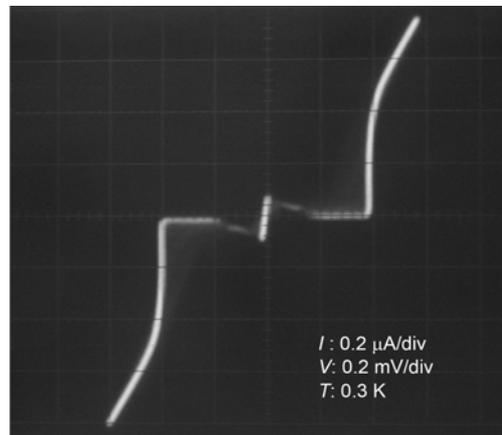


图 4 Al 隧道结在 0.3 K 下的 I - V 曲线

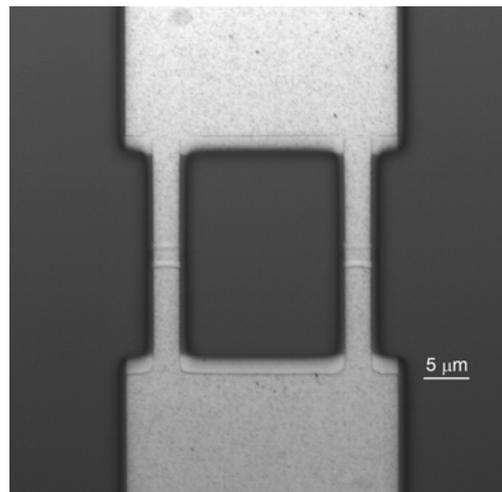


图 5 DC-SQUID 的光学图

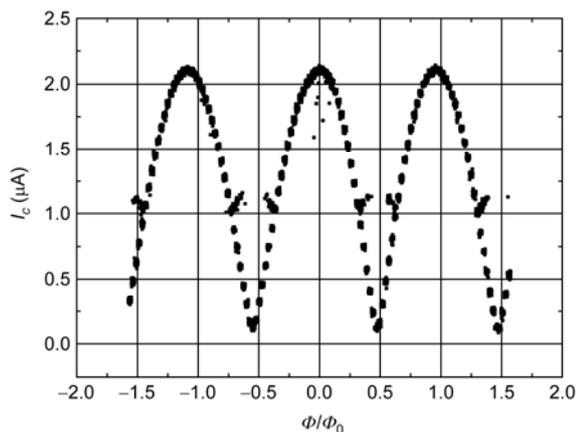


图6 在 20 mK 下流过 DC-SQUID 的电流与外加磁通的关系

$\times 40 \mu\text{m}$, 线宽为 $4 \mu\text{m}$, 膜厚 200 nm. 我们采用牛津仪器公司生产的型号为 Kelvinox400MX 的稀释制冷机搭建了一套制冷测量系统. 在 20 mK 下测得此 DC-SQUID 超导流, 漏电流约为 $0.007 \mu\text{A}$. 漏电流与超

导临界电流的比值为 0.33%.

外加磁通影响下流过 DC-SQUID 的电流满足:

$$I_s = I_c \sin(2\pi\Phi/\Phi_0). \quad (1)$$

因此, DC-SQUID 可以在特定的条件下测量出微小的磁通变化. 如图 6 所示的 DC-SQUID 可测出外界磁通为 $B \approx 2.0 \times 10^{-4} \text{ T}$.

4 总结

我们用双层光刻胶构成悬空掩模, 电子束斜蒸发的方法制备 Al/Al₂O₃/Al 隧道结, 通过势垒层制备条件的控制得到特定参数的铝超导隧道结. 实验中所制备铝超导隧道结漏电流占超导临界电流的比例为 0.5%, DC-SQUID 漏电流占超导临界电流的比例为 0.33%, 达到构建量子超导比特的要求. 并能通过改变势垒层生长的氧分压与氧化时间来控制铝超导隧道结的特定参数, 为后续制备量子超导比特电路奠定了良好的基础.

参考文献

- Xu W W, Chen J, Kang L, et al. Extraction of the spectral information of terahertz signals using superconducting Josephson junction. *Chinese Sci Bull*, 2010, 53: 1247–1251
- Cui B, Zhang X Q, Sun L, et al. A high-performance narrowband high temperature superconducting filter. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55: 1367–1371
- Xia H H, Zhou C X, Zuo T, et al. Development of high-temperature superconducting filters operating at temperatures above 90 K. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54: 3596–3599
- Gao L, Guo J, Wang Y H, et al. A 23 GHz high-temperature superconducting microstrip filter for radio astronomy. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54: 3485–3488
- Wei B, Guo X B, Piao Y L, et al. Field test of HTS receivers on CDMA demonstration cluster in China. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54: 612–615
- You L X, Shen X F, Yang X Y, et al. Single photon response of superconducting nanowire single photon detector. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55: 441–445
- Wang J P, Li Y B, Kang L, et al. Design and fabrication of superconducting HEB mixer. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54: 2013–2017
- Van D W C H, Ter H A C R, Wilhelm F K. Quantum superposition of macroscopic persistent-current states. *Science*, 2000, 290: 773–777
- Mooij J E, Orlando T P, Levitov L, et al. Josephson persistent-current qubit. *Science*, 1999, 285: 1036–1039
- Wirth T, Lisenfeld J, Lukashenko A, et al. Microwave readout scheme for a Josephson phase qubit. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 262508
- Romans E J, Osley E J, Young L, et al. Three-dimensional nanoscale superconducting quantum interference device pickup loops. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 222506
- Clarke J. Flux qubit completes the hat trick. *Science*, 2003, 299: 1850–1851
- Clarke J, Wilhelm F K. Superconducting quantum bits. *Nature*, 2008, 453: 1031–1042
- Chiorescu I, Nakamura Y, Harmans C J M P, et al. Coherent quantum dynamics of a superconducting flux qubit. *Science*, 2003, 299: 1869–1871
- Orlando T P, Mooij J E, Tian L, et al. Superconducting persistent-current qubit. *Phys Rev B*, 1999, 60: 15398
- Nakamura Y, Pashkin Y A, Tsai J S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. *Nature*, 1999, 398: 786–788
- Blatter G, Geshkenbein V B, Ioffe L B. Design aspects of superconducting-phase quantum bits. *Phys Rev B*, 2001, 63: 174511

- 18 Chiorescu I, Bertet P, Semba K, et al. Coherent dynamics of a flux qubit coupled to a harmonic oscillator. *Nature*, 2004, 431: 159–162
- 19 Friedmann J R, Patel V, Chen W, et al. Quantum superposition of distinct macroscopic states. *Nature*, 2000, 406: 43–46
- 20 Lotkhov S V, Tolkacheva E M, Balashov D V, et al. Low hysteretic behavior of Al/AIO_x/Al Josephson junctions. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 132115
- 21 Lang K M, Nam S, Aumentado J, et al. Banishing quasiparticles from Josephson-junction qubits: Why and how to do it. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2003, 13: 989–991
- 22 Berkley A J, Xu H, Gubrud M A, et al. Decoherence in a Josephson-junction qubit. *Phys Rev B*, 2003, 68: 060502
- 23 Dolan G J. Offset masks for lift-off photoprocessing. *Appl Phys Lett*, 1977, 31: 337–339
- 24 Holmqvist T, Meschke M, Pekola J P. Double oxidation scheme for tunnel junction fabrication. *J Vac Sci Technol B*, 2008, 26: 1071–1023