

# 原子级控制的约瑟夫森结中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 势垒层制备工艺

李中祥<sup>1)3)</sup> 王淑亚<sup>2)</sup> 黄自强<sup>4)5)</sup> 王晨<sup>4)5)</sup> 穆清<sup>2)†</sup>

1) (郑州大学国家超级计算郑州中心, 郑州 450001)

2) (数学工程与先进计算国家重点实验室, 郑州 450001)

3) (郑州大学计算机与人工智能学院, 郑州 450001)

4) (复旦大学微电子学院, 上海 200433)

5) (上海集成电路制造创新中心, 上海 200433)

(2022年4月26日收到; 2022年7月4日收到修改稿)

传统热氧化方式制备约瑟夫森结中  $\text{AlO}_x$  势垒层是将高纯度氧气扩散到 Al 表面进行, 但该方式制备的势垒层氧化不完全, 厚度难以精准控制. 本文采用原子层沉积方式在金属 Ti 表面逐层生长  $\text{Al}_2\text{O}_3$  势垒层, 并制备出三明治结构的 Ti/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Ti 约瑟夫森结. 通过调节  $\text{Al}_2\text{O}_3$  势垒层的沉积厚度和约瑟夫森结的面积研究了其相应的微观结构及电学性质. 实验结果表明, 原子层沉积方式生长的单层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜厚度约为 1.17 Å ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ), 达到原子级控制势垒层厚度, 通过调节势垒层厚度实现了对结室温电阻值的控制, 并通过优化结面积获得了室温电阻均匀性良好的约瑟夫森结.

**关键词:** 原子层沉积,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  势垒层, 约瑟夫森结, 室温电阻**PACS:** 81.15.Gh, 77.84.Bw, 85.25.Cp, 84.37.+q**DOI:** 10.7498/aps.71.20220820

## 1 引言

作为超导量子电路中唯一的无损耗非线性元件<sup>[1]</sup>, 约瑟夫森结通常是一种超导体-绝缘体-超导体结构的超导隧道结, 其工作原理是基于极低温下由电子形成的库珀对的隧穿效应. 由于半导体工业的兼容性, 约瑟夫森结是实现超导量子比特的重要方式之一, 中间超薄绝缘体构成的势垒层是实现两侧超导电极相干性的关键所在<sup>[2]</sup>. 在材料选择上, 由于 Al 的氧化物质地坚固, 钝化性能好且适合库珀对的隧穿, 一般采用 Al 的氧化物作为约瑟夫森结的势垒层<sup>[3,4]</sup>. 目前, 通常采用原位热氧化方式将氧气扩散到 Al 表面制备  $\text{AlO}_x$  势垒层<sup>[5]</sup>, 但该反应是

自限制的, 形成的  $\text{AlO}_x$  薄膜会阻碍氧原子扩散到下方的 Al 表面, 随着反应时间增加,  $\text{AlO}_x$  薄膜逐渐变厚, 最终将彻底阻挡氧原子, 使其无法扩散至 Al 表面, 从而达到生长极限厚度<sup>[6]</sup>. 同时, 由于氧分压难以精确控制等问题, 热氧化工艺难以制备出均匀且厚度精准控制的势垒层. 此外采用热氧化方式制备的  $\text{AlO}_x$  势垒层 (其化学计量是不确定的, 一般利用退火工艺将  $\text{AlO}_x$  转变为质量较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[7]</sup>), 存在例如氧空位等缺陷会引起量子电路中的两能级涨落, 这也是造成量子比特退相干的主要原因<sup>[8]</sup>. 想要进一步提高退相干时间, 关键在于提升势垒层质量, 所以使用一种新的势垒层生长方式制备约瑟夫森结势在必行.

原子层沉积 (atomic layer deposition, ALD) 是一种化学沉积过程, 能够满足连续、自限制表

† 通信作者. E-mail: muqing@meac-skl.cn

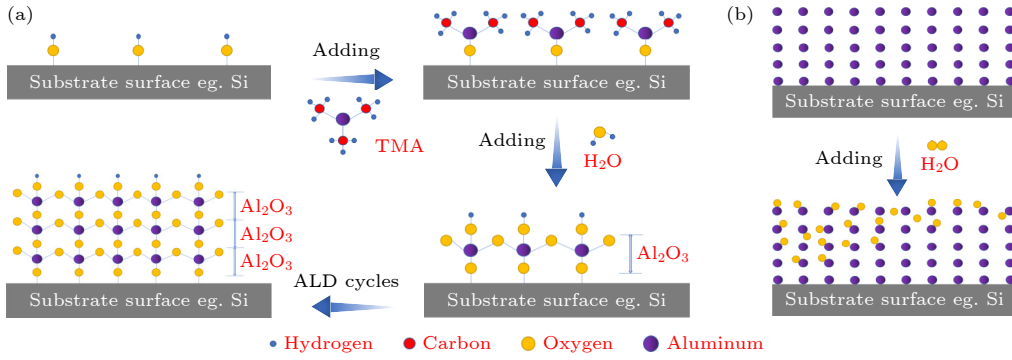


图1 ALD与热氧化方式生长氧化铝势垒层的过程示意图 (a) ALD生长 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的过程; (b) 热氧化方式生长 $\text{AlO}_x$ 的过程

Fig. 1. Schematic diagram of the process of growing aluminum oxide layer by ALD and thermal oxidation: (a) Process of growing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  by ALD; (b) process of growing  $\text{AlO}_x$  by thermal oxidation.

面反应的原子层控制和共形沉积的需要<sup>[9]</sup>, 自限制表面反应限制外界原子向薄膜下方扩散, 从而在薄膜上方不断堆积, 每个循环生长一层原子薄膜. 如图1(a)所示, ALD生长 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 发生在水和三甲基铝(trimethylaluminium, TMA)交替暴露的过程中, 这一过程可以描述为<sup>[10–12]</sup>



其中, 带\*号表示表面物质. 衬底可选用硅(Si)或者一些金属, 因其表面比较容易羟基化. TMA( $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ )与表面羟基( $\text{OH}^*$ )反应, 会在表面沉积一层 $\text{Al}(\text{CH}_3)_2$ , 之后通入惰性气体引入水, 水在表面反应物上又再次羟基化, 形成一个完整的ALD循环, 生长一层 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜. 重复这一过程可以获得连续、均匀、无孔的高质量 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜<sup>[13]</sup>, 制备出的薄膜两能级缺陷密度较低<sup>[14]</sup>. 然而, 热氧化(图1(b))是通过氧气从Al表面向下扩散形成氧梯度生长 $\text{AlO}_x$ 隧道势垒层, 可控性较差. 因此ALD通过逐层向上生长的方式制备 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 隧道势垒层具有显著优势. 在上述研究背景下, 本文对ALD方式生长的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 隧道势垒层及制备出的相应Ti/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Ti约瑟夫森结进行了探索和研究, 利用ALD生长 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜的各项优点, 通过剥离工艺制备出了多组势垒层厚度不同、结区面积不同的Ti/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Ti约瑟夫森结, 并对其断面微观结构以及电学性质进行了测量研究.

## 2 实验

### 2.1 约瑟夫森结制备

首先, 沉积底电极. 在Si衬底上旋涂光刻胶,

利用光刻技术定义出底层金属图形, 然后采用磁控溅射方式以 $0.28 \text{ nm/s}$ 的速率沉积Ti金属薄膜(图2(a)), 之后使用剥离工艺将图形转移到金属层, 形成底电极. 随后, 开始制备势垒层. 由于样品在剥离工艺结束后在转移过程中会接触空气, 底电极表面不可避免会形成一层自然氧化层(图2(b)). 使用基于氦氢混合气体( $95\% \text{ He} : 5\% \text{ H}_2$ )的反应预清洁(reactive pre-clean, RPC)技术去除底电极表面自然氧化层<sup>[15]</sup>(图2(c)), 并在真空( $9.9 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ ,  $1 \text{ Torr} = 1.33 \times 10^2 \text{ Pa}$ )中原位传输样品到薄膜生长腔室. 在进行ALD反应之前, 由于腔室温度较高, 一般将样品在腔室内预热 $5 \text{ min}$ , 有利于衬底表面羟基化, 使反应更加顺利. 采用ALD方式在底电极表面生长 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 势垒层(图2(d)), 腔室温度为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 每次循环通入 $0.5 \text{ s}$ 的水, 氮气吹扫反应残余物 $9 \text{ s}$ , 接着通入TMA $0.5 \text{ s}$ , 氮气吹扫反应残余物 $5 \text{ s}$ . 最后, 沉积顶电极. 顶电极定义方式和沉积方式(图2(e))与底电极相同, 剥离后, 顶电极与底电极金属线条垂直相交形成完整的约瑟夫森结(图2(f)). 其中, 约瑟夫森结的面积固定为 $44 \mu\text{m} \times 44 \mu\text{m}$ , 在该结面积下分别生长12, 15, 20, 25个循环的势垒层, 制备出4组不同势垒层厚度的约瑟夫森结, 底部与顶部的Ti电极厚度均为 $100 \text{ nm}$ . 此外, 将势垒层ALD循环次数固定为12次循环, 在相同势垒层厚度下, 分别制备 $0.04, 0.09, 0.25, 0.49, 1.00 \mu\text{m}^2$ 等5组不同面积的约瑟夫森结, 顶部与底部的Ti电极厚度均为 $30 \text{ nm}$ .

### 2.2 约瑟夫森结的表征测试

利用透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)对约瑟夫森结中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 隧道势

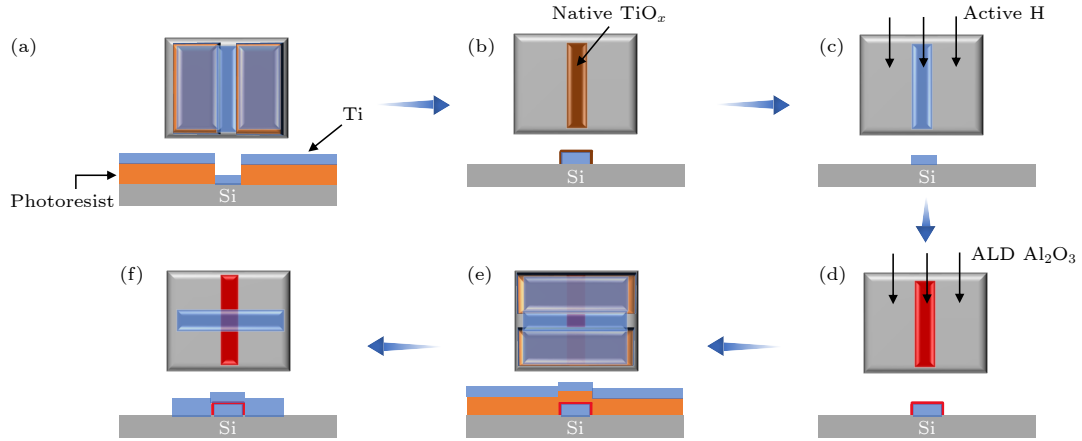


图 2 约瑟夫森结制备过程示意图 (a) 光刻后第一次溅射 Ti 示意图; (b) 光刻胶剥离后, Ti 金属电极表面立即形成自然氧化层; (c) 使用 RPC 技术利用活性氢去除氧化层; (d) 去除自然氧化层后原位 ALD 生长  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (e) 第二次光刻确定顶电极图案, 并进行第二次溅射 Ti; (f) 金属剥离形成完整的结

Fig. 2. Schematic diagram of Josephson junction preparation process: (a) Schematic diagram of the first sputtered Ti after photolithography; (b) natural oxide layer formed on the Ti metal electrode surface immediately after lift-off process; (c) removal of the oxide layer using the RPC technique by reactive hydrogen; (d) *in situ* ALD growth of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  after removal of the natural oxide layer; (e) the second photolithography to determine the top electrode pattern and sputtered Ti again; (f) lift-off process to complete the junction.

垒层的厚度进行表征. 利用拥有  $0.5 \mu\text{m}$  铂探针的多点接口 (multi point interface, MPI) 探针台以及是德科技 (Keysight) 4200 参数分析仪测量约瑟夫森结室温下的电流-电压 ( $I-V$ ) 曲线, 并从  $I-V$  曲线的斜率中提取室温电阻 ( $R_n$ ). 安倍戈卡-巴拉托夫 (Ambegaokar-Baratof) 公式<sup>[16]</sup> 预测隧道电阻, 即室温电阻和结面积 ( $A$ ) 的乘积, 与其临界电流密度 ( $J_C$ ) 成反比:

$$R_n = \frac{\pi\Delta}{2eJ_C A}, \quad (3)$$

其中  $\Delta$  为超导能隙,  $e$  是元电荷. 为实验测量室温电阻判断参数是否符合要求提供了依据<sup>[17,18]</sup>. 此外, 约瑟夫森结室温电阻值的波动会受到结区面积变化的影响<sup>[19,20]</sup>, 不同结面积的约瑟夫森结的室温电阻值波动程度不同.

### 3 结果分析与讨论

为了研究 ALD 逐层生长  $\text{Al}_2\text{O}_3$  势垒层的效果, 我们使用 TEM 对势垒层断面微观结构进行了测量表征. 图 3(a) 显示了势垒层厚度为 12 次循环 (12 层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜) 的 Ti/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Ti 约瑟夫森结断面结构. 测量得到的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  势垒层厚度为  $1.4 \text{ nm}$ , 则单层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜厚度约为  $1.17 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ), 说明使用 ALD 工艺通过控制循环的次数, 可以实现对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  势垒层厚度的原子级控制.

接下来测量了不同势垒层厚度下约瑟夫森结的室温电阻, 来探究势垒层厚度与室温电阻之间的关系, 见图 3(b). 结面积固定为  $44 \mu\text{m} \times 44 \mu\text{m}$ , 势垒层厚度的变化通过 ALD 循环次数来控制. 对不同势垒层厚度下约瑟夫森结的室温电阻进行了多次测量, 并统计其平均值. 当势垒层厚度大于 12 次循环时, 随循环次数增加, 室温电阻值呈指数变化增长,  $R_n A$  变化范围约为  $10^4$ — $10^8 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ , 说明室温电阻值与势垒层厚度呈指数关系. 根据测量得到的电阻值以及 (3) 式, 在 Ti 的超导临界转变温度  $0.4 \text{ K}$  下计算得到临界电流密度  $J_C$  与 ALD 循环次数之间的关系. 随着循环次数增加, 临界电流密度  $J_C$  呈指数下降, 其变化范围约为  $10^{-4}$ — $10^0 \text{ A/cm}^2$ . 这些结果表明可以通过调节循环次数, 实现原子级控制势垒层厚度, 从而精准地控制室温电阻值, 得到所需的临界电流密度.

为了探究 ALD 方式制备的约瑟夫森结室温电阻均匀性问题, 在势垒层厚度为 12 次循环 (12 层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜) 下, 制备了 5 组 Ti/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Ti 约瑟夫森结, 其结面积大小分别为  $0.04, 0.09, 0.25, 0.49, 1.00 \mu\text{m}^2$ . 通过测量其室温电阻值并采用相对标准偏差 (relative standard deviation, RSD) 的方式来计算其均匀性. 图 4 显示了不同结面积下约瑟夫森结的典型  $I-V$  曲线以及电阻均匀性与结面积之间的关系, 具体测量值见表 1.

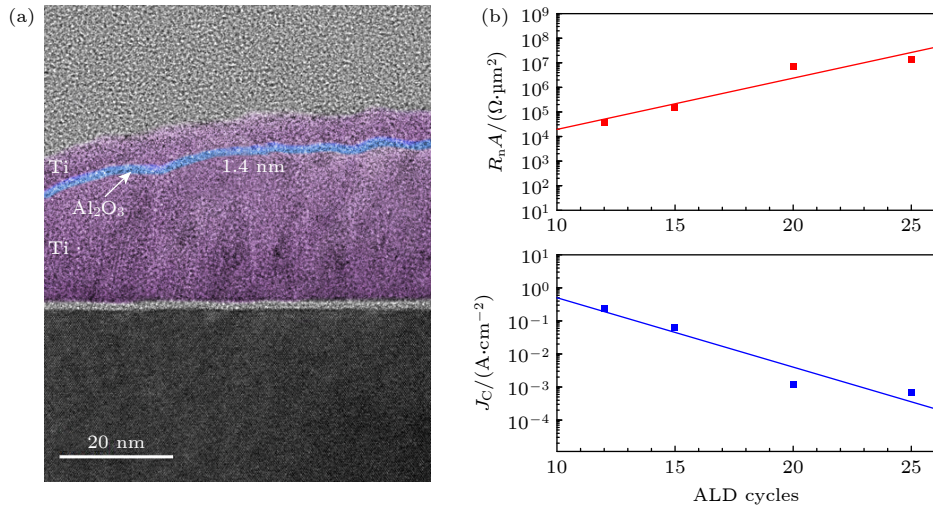


图 3 (a) 势垒层厚度为 12 层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的约瑟夫森结断面结构 TEM 图像; (b) 隧道电阻  $R_n A$ , 计算得到的  $J_C$  与 ALD 循环次数的关系

Fig. 3. (a) TEM image of Josephson junction cross-sectional structure with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tunnel barrier's thickness is 12 layers; (b) relationship between the tunnel resistance  $R_n A$ , the calculated  $J_C$  and the ALD cycles.

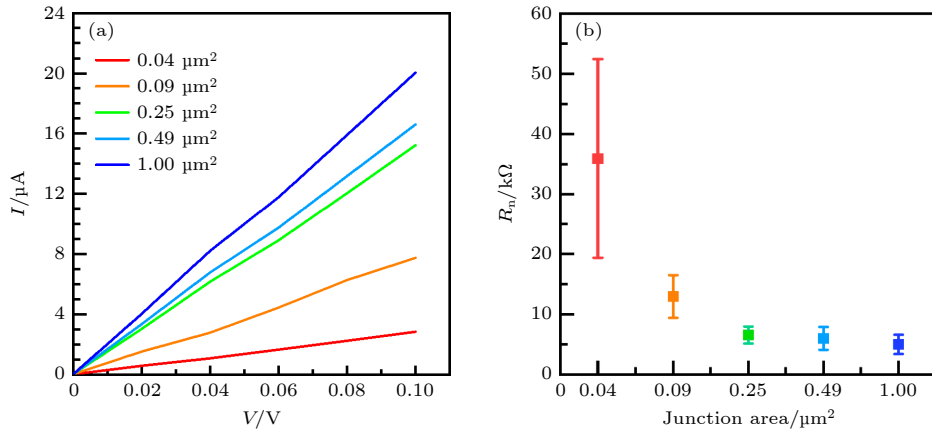


图 4 不同结面积下约瑟夫森结的室温电阻测量结果以及其均匀性数据图 (a) 室温下测量的不同结面积下约瑟夫森结的  $I$ - $V$  曲线; (b) 结面积与电阻值之间的关系 (图中点表示测量电阻的平均值, Y 误差棒使用标准差计算)

Fig. 4. Room temperature resistance measurements of Josephson junctions at different junction areas and their uniformity data plotted: (a)  $I$ - $V$  curves of Josephson junctions at different junction areas measured at room temperature; (b) relationship between junction areas and resistance values (The dots in the graphs indicate the mean values of the measured resistances, and the Y error bars are calculated using the standard deviation).

表 1 不同结面积的约瑟夫森结室温电阻比较  
Table 1. Comparison of room temperature resistance of Josephson junctions with different areas.

结面积/ $\mu\text{m}^2$	0.04	0.09	0.25	0.49	1.00
电阻平均值/ $\text{k}\Omega$	35.9	12.9	6.55	5.99	5.00
RSD/%	45.0	27.0	21.0	31.0	31.7

约瑟夫森结的电阻值与结面积成反比, 结面积越小, 其电阻值越大. 此外, 器件尺寸越小, 对制备工艺的要求越高, 结面积越小的约瑟夫森结在制备过程中越难以控制参数, 因此会导致其电阻值的 RSD 偏大. 通过约瑟夫森结面积的优化以及电阻

均匀性的对比, 在结面积为  $0.25 \mu\text{m}^2$  时获得了均匀性较好的室温电阻值, 其 RSD 为 21%, 该结论可为将来批量制备约瑟夫森结以及可扩展的量子芯片提供参考.

## 4 结 论

采用原子层沉积  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜制备技术和剥离工艺, 以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜作为势垒层在 Si 衬底制备了三明治结构的 Ti/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Ti 约瑟夫森结, 并对制备约瑟夫森结的微观结构以及室温条件下的电学性

质测试进行研究. 实验结果表明, 单层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜厚度约为 1.17 Å, 达到了原子级控制. 随着 ALD 循环次数增加,  $R_n$  呈指数增长 (循环次数变化范围为 12—25 时, 其对应电阻变化范围约为  $10^4$ — $10^8 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ ), 因此可通过调节 ALD 循环次数来控制势垒层厚度, 进而实现对室温电阻的调控. 此外, 通过优化约瑟夫森结面积, 在结面积为  $0.25 \mu\text{m}^2$  时获得了 RSD 为 21% 的均匀性较好的室温电阻. 后续工作中, 我们将持续优化 ALD 生长  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的条件, 并通过多样化基底材料与多样化势垒层生长工艺相结合的探索, 为实现高质量可扩展的超导量子芯片提供有价值的技术参考.

### 参考文献

- [1] Xiong K L, Feng J G, Zheng Y R, Cui J Y, Weng W K, Zhang S Y, Li S F, Yang H 2022 *Chin. Sci. Bull.* **67** 143 (in Chinese) [熊康林, 冯加贵, 郑亚锐, 崔江煜, 翁文康, 张胜誉, 李顺峰, 杨辉 2022 科学通报 **67** 143]
- [2] Abelson L A, Kerber G L 2004 *Proc. IEEE*. **92** 1517
- [3] Shapiro S 1963 *Phys. Rev. Lett.* **11** 80
- [4] Clarke J 1972 *Phys. Rev. Lett.* **28** 1363
- [5] Gurvitch M, Washington M A, Huggins H A 1983 *Appl. Phys. Lett.* **42** 472
- [6] Cai N, Zhou G W, Muller K, Starr D E 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 171605
- [7] McDermottin R 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 2
- [8] Oh S, Cicak K, Kline J S, Sillanpaa M A, Osborn K D, Whittaker J D, Simmonds R W, Pappas D P 2006 *Phys. Rev. B* **74** 100502
- [9] George S M 2010 *Chem. Rev.* **110** 111
- [10] George S M, Ott A W, Klaus J W 1996 *J. Phys. Chem.* **100** 13121
- [11] Dillon A C, Ott A W, Way J D, George S M 1995 *Surf. Sci.* **322** 230
- [12] Ott A W, Klaus J W, Johnson J M, George S M 1997 *Thin Solid Films* **292** 135
- [13] Groner M D, Elam J W, Fabreguette F H, George S M 2002 *Thin Solid Films* **413** 186
- [14] Khalil M S, Stoutimore M J A, Gladchenko S, Holder A M, Musgrave C B, Kozen A C, Rubloff G, Liu Y Q, Gordon R G, Yum J H, Banerjee S K, Lobb C J, Osborn K D 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 162601
- [15] Delavant M, Guilan J, Galpin D, Chhun S, Juhel M, Guilleux D, Jian P, Ha T H, Forster J, Guggilla S, Hong S, Bozon B 2012 *Microelectron. Eng.* **92** 38
- [16] Ambegaokar V, Baratoff A 1963 *Phys. Rev. Lett.* **10** 486
- [17] Steinbach A, Joyez P, Cottet A, Esteve D, Devoret M H, Huber M E, Martinis J M 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 137003
- [18] Zhang E J, Srinivasan S, Sundaresan N, et al. 2020 arXiv: 2012.08475 [quant-ph]
- [19] Osman A, Simon J, Bengtsson A, Kosen S, Krantz P, Lozano D P, Scigliuzzo M, Dlesing P, Bylander J, Roudsari A F 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 064002
- [20] Verjauw J, Acharya R, Damme J V, et al. 2022 arXiv: 2202.10303 [quant-ph]

# Preparation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tunnel barrier layer in atome-level controlled Josephson junction

Li Zhong-Xiang<sup>1)3)</sup> Wang Shu-Ya<sup>2)</sup> Huang Zi-Qiang<sup>4)5)</sup>  
Wang Chen<sup>4)5)</sup> Mu Qing<sup>2)†</sup>

1) (*National Supercomputing Center in Zhengzhou, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

2) (*State Key Laboratory of Mathematical Engineering and Advanced Computing, Zhengzhou 450001, China*)

3) (*School of Computer and Artificial Intelligence, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

4) (*School of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

5) (*Manufacturing Innovation Center Company Ltd., Shanghai 200433, China*)

( Received 26 April 2022; revised manuscript received 4 July 2022 )

## Abstract

The AlO<sub>x</sub> tunnel barrier in Josephson junctions prepared by conventional thermal oxidation method is formed by diffusing high-purity oxygen into the surface of Al. But the tunnel barrier fabricated by this method is not completely oxidized, and the thickness of barrier is hard to control accurately. In this work, we use atomic layer deposition to grow Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tunnel barrier on the surface of Ti. The sandwich structure of Ti/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti Josephson junction is grown layer by layer. We investigate the corresponding microstructure and electrical properties by adjusting the thickness of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tunnel barrier and the area of the junction. The experimental results show that the monolayer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film is about 1.17 Å (1 Å = 10<sup>-10</sup> m), which is grown by atomic layer deposition, achieves atomic-level controlled thickness. The resistance is controlled by adjusting the barrier thickness at room temperature. And we obtain a Josephson junction with good resistance uniformity at room temperature by optimizing the junction area.

**Keywords:** atomic layer deposition, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tunnel barrier, Josephson junction, room temperature resistance

**PACS:** 81.15.Gh, 77.84.Bw, 85.25.Cp, 84.37.+q

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220820

---

† Corresponding author. E-mail: [muqing@meac-skl.cn](mailto:muqing@meac-skl.cn)

## 原子级控制的约瑟夫森结中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 势垒层制备工艺

李中祥 王淑亚 黄自强 王晨 穆清

### Preparation of $\text{Al}_2\text{O}_3$ tunnel barrier layer in atome-level controlled Josephson junction

Li Zhong-Xiang Wang Shu-Ya Huang Zi-Qiang Wang Chen Mu Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 218102 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220820

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220820>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 原子层沉积的超薄InN强化量子点太阳能电池的界面运输

Enhancement of interface transportation for quantum dot solar cells using ultrathin InN by atomic layer deposition

物理学报. 2021, 70(18): 187702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210554>

#### Al纳米颗粒表面等离激元对ZnO光致发光增强的研究

Enhancement of photoluminescence from zinc oxide by aluminum nanoparticle surface plasmon

物理学报. 2019, 68(10): 107301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190062>

#### 基于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoO}_3$ 复合阳极缓冲层的倒置聚合物太阳能电池的研究

Enhanced performance of inverted polymer solar cell based on  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoO}_3$  as composite anode buffer layer

物理学报. 2018, 67(6): 067201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172311>

#### $\text{Bi}_2\text{Te}_3(111)$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 衬底对 $\text{Bi}(111)$ 双原子层的电子结构及拓扑性质的影响

Effects of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3(111)$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$  substrates on electronic and topological properties of  $\text{Bi}(111)$  bilayer

物理学报. 2022, 71(13): 137101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220060>

#### 气相沉积技术在原子制造领域的发展与应用

Development and application of vapor deposition technology in atomic manufacturing

物理学报. 2021, 70(2): 028101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201436>

#### $\text{MgO}$ 衬底上 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 台阶边沿型约瑟夫森结的制备及特性

Fabrication and characterization of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  step-edge Josephson junctions on  $\text{MgO}$  substrate for high-temperature superconducting quantum interference devices

物理学报. 2021, 70(3): 037401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201291>