

实现超导量子比特芯片的微纳加工方法

宿非凡^{1,2,3} 杨钊华⁴

(¹ 中国电子信息产业集团长城实验室, 湖南 长沙 410205; ² 天津先进技术研究院, 天津 300459;
³ 合肥国家实验室, 安徽 合肥 230094; ⁴ 中国科学院物理研究所, 北京 100190)

摘要 近年来随着各个科技强国和科技巨头企业的高度重视, 超导量子计算技术发展迅速, 在不到 10 年的时间内单个超导量子比特的退相干时间增长了 5 个数量级, 从纳秒提高到了百微秒的量级, 并有望提高到毫秒量级甚至秒的量级。超导量子比特芯片的制备是实现超导量子计算的基础, 作为“物理前沿介绍——超导量子计算”系列的第六篇, 本文系统阐述制备超导量子比特及其辅助器件芯片的微纳加工方法, 并对制备方法的发展趋势作展望。通过本文, 旨在帮助广大高校物理专业教师、高年级本科生、研究生以及对超导量子计算感兴趣的理工科背景读者系统了解实现超导量子比特芯片的微加工方法与工艺, 全面地、实物化地理解超导量子计算技术。

关键词 超导量子比特; 约瑟夫森结; 空气桥

MICROFABRICATION METHODS FOR REALIZING
SUPERCONDUCTING QUBIT CHIPSSU Feifan^{1,2,3} YANG Zhaohua⁴

(¹ China Electronics Information Industry Group Great Wall Laboratory, Changsha, Hunan 410205;

² Tianjin Advanced Technology Research Institute, Tianjin 300459;

³ Hefei National Laboratory, Hefei, Anhui 230094;

⁴ Institute of physics Chinese Academy of Science, Beijing 100190)

Abstract In recent years, with the high attention of various technological powers and giants, superconducting quantum computing technology has developed rapidly. In less than 10 years, the decoherence time of a single superconducting qubit has increased by 5 orders of magnitude, from nanoseconds to hundreds of microseconds, and is expected to increase to millisecond or even second levels. The preparation of superconducting qubit chips is the foundation for achieving superconducting quantum computing. As the sixth article in the “Introduction to Physical Frontiers—Superconducting Quantum Computing” series, this article systematically elaborates on the micro-fabrication methods for preparing superconducting qubits and co-auxiliary device chips, and looks forward to the development trend of fabrication methods. Through this article, the aim is to help university physics teachers, senior undergraduate and graduate students, as well as readers with a background in science and engineering who are interested in

收稿日期: 2022-06-08

通信作者: 宿非凡, 合肥国家实验室副教授、高级工程师, sufeifan@ustc.edu.cn。

引文格式: 宿非凡, 杨钊华. 实现超导量子比特芯片的微纳加工方法[J]. 物理与工程, 2024, 34(2): 10-18.

Cite this article: SU F F, YANG Z H. Microfabrication methods for realizing superconducting qubit chips[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(2): 10-18. (in Chinese)

superconducting quantum computing, systematically understand the micro-fabrication methods and processes for implementing superconducting qubit chips, and gain a comprehensive and practical understanding of superconducting quantum computing technology.

Key words superconducting qubit; Josephson junction; air bridge

2021年9月,在庆祝杨振宁先生百年诞辰的大会上,中国科学院院士、北京量子信息学院院长向涛讲道:“现在量子计算的方案很多,粗略地可分为固态方案和非固态方案。非固态方案包括离子阱量子计算、光子量子计算等。但是,量子计算要真正做到大规模和集成化,固态方案从技术角度看可行性是最高的。现在并不知道量子计算能解决多少问题,其研究状态和刚刚发明计算机的时候很相似。在计算机刚出现的时候,我相信没人能想到它能够成为改变人类生活方式的一项伟大发明。量子计算技术可能是再次改变人类生活方式的一项技术,因为它的计算能力要远远大于现在基于半导体芯片的计算技术。假设能够实现,100个量子比特的量子计算机的计算能力就会远远大于现在全世界所有计算机加起来的计算能力。因此可以想象,如果这样的技术一旦出现,我们的社会将发生根本性变化。”

目前,向涛院士站在时代前沿所预见的社会变化已经初见苗头,诸多传统行业的国际商业巨头已经将目光对准了量子计算技术,例如宝马公司宣称将利用量子计算进行汽车的设计与制造、现代汽车将通过量子计算进行物体检测、西门子将利用量子计算增强开发解决方案、勃林格殷格翰将通过量子计算进行药物研发、渣打银行将通过量子计算探索投资组合优化……这些事实增加了我国在全球量子计算竞赛中取得突破的紧迫性。如向涛院士所言,量子计算的固态方案最有可能做到普适的量子计算,而超导量子计算方案在固态方案中因为其有易扩展、易操控、制备方法易于工业化等方面的优势^[1],研究比例占全球量子计算研究的近1/3,很有希望率先实现普适量子计算。

作为“物理前沿介绍——超导量子计算”系列的第六篇,本文将在前文的基础上按照超导量子比特及其辅助器件芯片制备的程式化顺序,从芯片基片选择和前处理、基底金属薄膜生长、超导电路图形转移与刻蚀、约瑟夫森结的制备等方面系统讨论超导量子比特及其辅助器件芯片的微

纳加工方法,为广大高校物理专业教师、高年级本科生、研究生以及对超导量子计算感兴趣的理工科背景读者提供一个可借鉴的清晰图景,同时也为传统半导体芯片制造业的读者了解超导量子比特芯片制备方法,实现技术互通有一定的帮助。

1 基片的选择以及前处理

超导量子计算的国际权威专家J. M. Martinis与其团队在他们超导量子计算的阶段性汇报文章^[2]中对芯片底层基片的介电损耗、约瑟夫森结与超导电路结构损耗、芯片器件辐射损耗等进行了详细的研究。研究结果明确表示高阻硅和蓝宝石这两种材质基片的介电损耗相较于其他常用材料而言是最小的,且利用这两种材料为基片所制备的超导量子比特芯片拥有更好的性能,基于上述理由至今在超导量子比特芯片的主流工艺中仍选取这两种材料作为基片使用。

在选定基片材料之后,首先要对基片表面进行细致的前处理。前处理基片表面的方法与传统半导体芯片制备工艺类似,大体可以分为化学处理方法(蚀刻、钝化等)和物理处理方法(离子铣削、热处理等)两类。具体来说,为了去除基片表面因基片转移等步骤引入的有机物等杂质,常用的前处理工艺是以分析纯级的丙酮溶液、异丙醇溶液、去离子水为工作液体对基片进行5~10分钟的超声清洗^[3]。此后,为进一步去除高阻硅与蓝宝石基片上附着更牢固的氧化层,可用氢氟酸(HF)对所选基片进行漂洗^[4],或者利用“食人鱼”试剂(双氧水溶液与浓硫酸以1:2的体积比混合)于120℃下静置浸泡基片10~20分钟。此外用1:1:5体积比的 $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 混合液于75℃环境中静置10分钟再利用1%浓度的HF清洗基片也可获得类似效果^[5]。此后,利用六甲基二硅氮(HDMS)对硅基片表面进行钝化可以使之形成纳米量级厚度的疏水薄膜,该薄膜可以有效减少硅基片与后续生长在其上的金属

薄膜间的界面损失,从而使制备的超导量子比特芯片拥有更高的谐振器品质因子^[6]。

对于蓝宝石基片来说,除了需要上述的前清理之外,为提高基片与金属薄膜层之间界面的接触质量,在基片上生长金属薄膜之前还应对蓝宝石基片进行 200~1000℃ 的加热退火^[7]。值得注意的是,虽然高温加热也可以减少硅基片表面的氧化污染物^[8],但需要注意高于 950℃ 的温度将明显增加硅基片表面的粗糙度,增加器件的损耗,因此在此选用硅基片时需要精确的控制加热温度。

2 金属薄膜的生长与特性

超导量子比特芯片基底的超导电路由超导薄膜组成,目前制备工艺中常用的超导薄膜为高纯金属单质或金属化合物^[9],由于金属薄膜中的杂质和缺陷对芯片的性能有明显的负面影响,因此金属薄膜的材料选择与生长是超导量子比特芯片整个制备中的关键一环。目前常用的金属以及金属化合物薄膜生长方法有超高真空磁控溅射生长、分子束外延生长与电子束蒸发生长三种。一般来说,超高真空磁控溅射生长既可以生长金属单质薄膜也可以生长金属化合物薄膜,而分子束外延生长与电子束蒸发生长一般用于金属单质薄膜的生长制备^[10]。

由于对铝薄膜制备研究起步较早,目前 90% 以上的超导量子比特芯片基底金属薄膜材料为铝单质^[11-15]。在微纳加工中生长金属铝的工艺较多,这些工艺各有优劣,例如电子束蒸发工艺可以产生均匀性与致密性良好的平坦薄膜,但生长的速度比物理或化学气相沉积慢得多,且对蒸发过程中坩埚中金属铝的预处理要求较高。

随着超导量子比特芯片性能的不断进步^[16],研究者注意到由于铝单质的超导转变温度在 1.2K 左右,其较低的超导能隙使之易于受到外界测量环境的噪声影响,因此这种金属铝的内在特性有可能限制了超导量子比特芯片性能的提高^[17]。目前一些研究者将目光转移到了超导物理中另一种人们熟悉的材料——金属铌上,铌单质的超导转变温度在 9.2K 左右,而且具有很高的临界磁场,对比铝单质的特性,应用金属铌为基底制备超导量子比特有可能解决金属铝存在的一些固有问题^[18],从而从根本限制上提高超导量子比

特芯片的性能。在实际微纳加工过程中,一般采用超高真空磁控溅射的方法生长铌单质薄膜^[19],该方法可以获得均匀性好、纯净度高、超导临界温度与块材基本一致的金属铌薄膜。

由于上述优点,研究人员对生长金属铌薄膜的磁控溅射工艺条件进行了多样的探索,有效地提高所生长金属铌薄膜的质量,例如在磁控溅射过程中利用短、高功率脉冲(high-power impulse magnetron sputtering,即 HiPIMS 工艺)取代传统磁控溅射过程中的稳恒射频电压可生长出更加致密的铌单质薄膜^[20],此外在磁控溅射生长铌单质薄膜过程中控制环境温度达到 550℃ 以上也可以有效的提升铌单质薄膜的剩余电阻比(超导特性)。

近年来,与金属铌同为 VB 族金属的金属钽(Ta),越来越多的引起人们的重视。钽单质除具有相对较高的超导转变温度($T_c=4.5\text{K}$)外,置于空气环境中的金属钽薄膜表面形成的氧化物比同条件下金属铌表面形成的氧化物拥有更稳定的化学性质^[21]。考虑到铌的金属氧化物对超导量子比特芯片性能有显著的负面作用^[22],将钽单质用于超导量子比特芯片的制备可以进一步提高超导量子比特芯片的性能。生长金属钽单质薄膜的方法与生长金属铌单质薄膜的方法相同,均采用磁控溅射的方法,但在生长过程中需要精确控制生长环境的温度以尽可能去除成膜过程中出现的对超导量子比特芯片性能有负面影响的 β 晶相薄膜^[23]。实验的结果确实令人感到振奋,目前在蓝宝石基片上生长钽单质金属薄膜基底的超导量子比特能量弛豫时间可以达到文献所报道过最高量级^[24]。

最后需要指出,金属薄膜因不均匀生长而出现的应力引起的形变会改变超导量子比特和 TLS (two-level systems)之间的相互作用,从而引起退相干对超导量子比特的性能产生负面的影响^[25,26]。一般通过对比金属薄膜的超导临界温度 T_c 与同材料标准 T_c 的差别来金属薄膜中是否存在应力^[27],再根据应力的分布情况反馈回磁控溅射的实验中,通过调节磁控溅射的实验参数来减少这种应力。

3 图形的转移

由于金属薄膜的边缘存在较大的电场强度分

布与 TLS, 超导电路金属薄膜边缘的粗糙度对超导量子比特芯片性能的好坏起关键的限制^[28], 因此在生长好的金属薄膜上进行理想的图形转移是超导量子比特芯片制备过程中的另一个重要步骤。目前图形转移微纳加工方法是光刻, 光刻方法又可以细分为掩模紫外光刻、激光直写 (DWL)、电子束曝光 (EBL) 三类。其中电子束曝光的精度最高, 而掩模紫外光刻的光刻时间最短, 近年来发展成熟的激光直写系统 (DWL) 兼备高精度、高时效且可兼容多种光刻胶 (SI8××系列、LOR 系列、SPR 系列、AZ 系列等) 等特点。利用直径为 2mm 的激光直写写头 (海德堡公司的 DWL 66+ 系统) 可达到 200nm 上下的图形精度, 满足了制备超导量子比特图形转移的工艺要求, 因激光直写工艺兼备多种优势, 其在目前的超导量子比特芯片制备中得到了广泛的应用。

光刻结束后需要对金属薄膜进行刻蚀来最终实现图形转移 (图形转移的整体过程示意图如图 1 所示), 刻蚀工艺通常可以分为干法刻蚀与湿法刻蚀两种。干法刻蚀具有稳定好, 可重复性强等优点, 但其往往需要独立的刻蚀仪器系统支持, 例如反应离子刻蚀机、电感耦合等离子体反应离子刻蚀机、微波等离子体刻蚀机等。另一方面, 湿法刻蚀所需的仪器设备简单, 但工艺效果受外界环境因素影响大, 工艺的稳定性与可重复性相较于干法刻蚀都略显不足。在实际的微纳加工过程中, 一般结合实验精度要求选择毒性低、精度可满足要求的工艺。例如选用化学湿法腐蚀刻蚀金属铝, 虽然工艺条稳定相对较低但可以避免干法刻蚀工艺所需的剧毒气体——氯气^[29], 而金属铌则选用干法刻蚀的方法以避免湿法刻蚀需要的强酸、强碱试剂^[30]。在目前可实现的技术方案内, 将上文中所讨论的激光直写技术与干法刻蚀工艺结合, 可以将所制备的铌金属薄膜图形边沿起伏控制在 30nm 上下, 实现在图形转移的过程中的较为理想保真度^[30]。

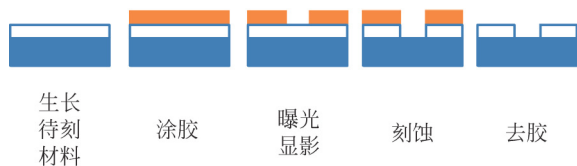


图 1 图形转移的刻蚀工艺示意图

4 约瑟夫森结的制备

制备超导量子比特的核心部件是约瑟夫森结^[31], 在目前的主流工艺中约瑟夫森结采用如图 2 所示的 Dolan 桥结构设计^[32], 具体实现约瑟夫森结的 Dolan 桥结构微纳加工工艺为如图 3 所示的 PMMA/MMA 多层电子束光刻胶曝光搭配变角度电子束金属蒸发工艺。考虑到金属铝的氧化物薄膜致密性好、硬度高、钝化强而且工艺可形成的氧化物薄膜厚度处于适合库珀对隧穿的范围内, 不论芯片的基底金属是否为金属铝, 均使用金属铝以及铝的氧化物来实现约瑟夫森结的制备。

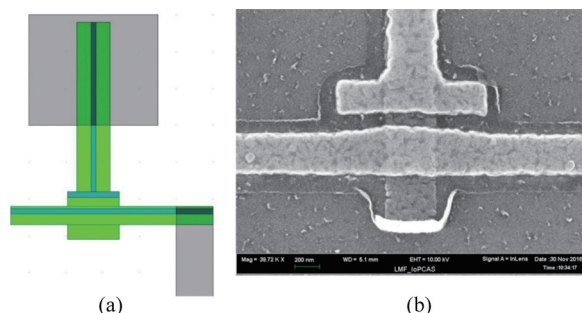


图 2 约瑟夫森结的 Dolan 桥
(a) 结构设计; (b) 实物电子显微镜照片

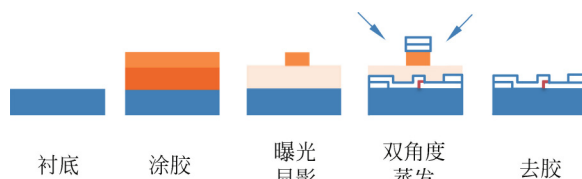


图 3 约瑟夫森结的微纳加工流程图

从物理上来说, 约瑟夫森结的特性是由超导体之间的弱连接层所决定的, 因此在实现约瑟夫森结的过程中需要精确地控制金属铝薄膜上氧化层的厚度。一般来说金属铝薄膜上的氧化物薄膜的生长速率与所处生长环境温度、氧气的压强和氧化的时间之间有着复杂的函数关系。在室温情况下, 金属铝薄膜上氧化层形成的过程中由于金属费米能级和金属氧化物能级之间的电子隧穿产生的电场会降低阻碍氧离子扩散的化学势垒, 所以氧化层生长的初期生长速率会较大, 随着氧化层的生长, 由于隧穿电流随着氧化薄膜厚度的增加而指数性的减小, 这个驱动电场也会随之减小, 氧化层生长逐渐变慢, 直到当驱动电场不足以使

金属的传导电子穿过化学势垒时氧化层将停止生长并达到极限厚度^[33]。安贝戈卡与巴拉托夫(Ambegaokar, Baratof)利用格林函数计算了约瑟夫森结系统的特性,得到了 Ambegaokar—Baratof 公式^[34]

$$J_s = R_n^{-1} \Delta_1(T) k \left(\left[1 - \frac{\Delta_1^2(T)}{\Delta_2^2(T)} \right]^{\frac{1}{2}} \right) \quad (1)$$

其中, J_s 为约瑟夫森临界电流密度, R_n 为常温电阻, Δ_1 与 Δ_2 分别是约瑟夫森结两边超导体的能隙(其中 Δ_1 为较小能隙), 在实验中当约瑟夫森结两边的超导体材料相同时, 可以得到 $k(0) = \frac{\pi}{2}$, 也就是说在超导量子比特芯片的制备中

$$J_s = \frac{\pi \Delta(T)}{2R_n} \quad (2)$$

式(2)提供了一个室温下正常态的隧穿电阻(R_n)与约瑟夫森结临界电流密度 J_s 的关系, 因此在实验中利用 Ambegaokar-Baratof 公式可以从较易于测得的约瑟夫森结室温电阻来判断其特性是否符合实验需求。

此后, 在将约瑟夫森结制备到超导量子比特芯片上时, 由于先前加工过程中不可避免地会在底层金属表面上引入杂质, 这些杂质会形成影响超流流动的杂散, 从而引起超导量子比特的退相干, 因此在制备过程中一般需要在生长约瑟夫森结前利用氩离子或氩氧混合离子束轰击超导电路对应位置(离子铣工艺)以消除这些杂质, 从而实现约瑟夫森结与超导电路地电极金属之间的超导连接。但是需要注意的是过大的离子铣功率可能会引起光刻胶变性从而影响后续的制备工艺。

进一步的系统研究表明由约瑟夫森结引起的超导量子比特器件噪声中有约 40% 位于如图 4 所示的因双角度蒸发工艺形成的寄生结内, 其余 60% 的缺陷在离子铣工艺后仍位于约瑟夫森结与底层金属电极的对应位置上, 而约瑟夫森结本身基本不贡献引起器件噪声的缺陷^[35]。基于以上事实, 可以通过改善约瑟夫森结与基底金属的连接

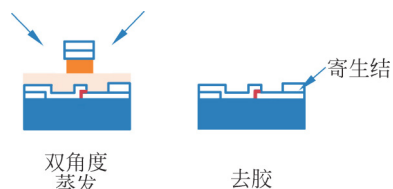


图4 在双角度蒸发制备约瑟夫森结时引入寄生结的示意图

设计来减少上述缺陷。如图 5 所示为两种新设计的约瑟夫森结与基底金属薄膜连接方式, 实验现实经过这种设计改良之后的芯片性能均有一定的提升^[35,36]。

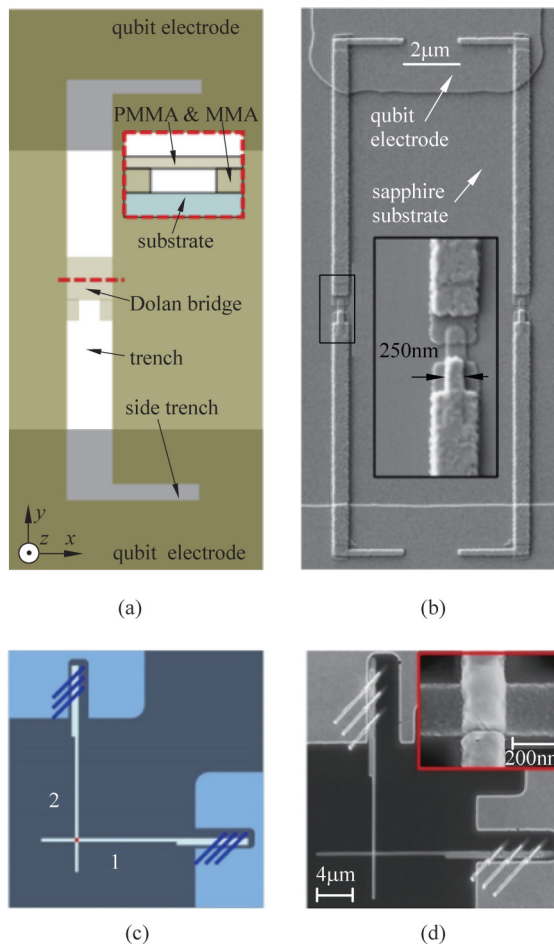


图5 约瑟夫森结新设计方案

(a), (c) 为示意图; (b), (d) 为对应制备的约瑟夫森结电子显微镜照片^[35,36]

5 多比特芯片跨线的制备

随着超导量子计算的不断发展, 同一芯片上的超导量子比特数目不断增多, 但是随着数目的不断增加, 共用地电极的多量子比特之间不可避免地会出现相互的串扰, 这种串扰将会影响对特定超导量子比特的精确操控。解决串扰问题的一个方法是在芯片的不同区域之间制备金属跨线将分离的地电极端连接起来, 从而使各个超导量子比特更好的接地。这种跨线的搭建工艺可以大致分为两种, 一种是多层膜叠加工艺^[10], 一种是空

气桥(air bridge)跨导工艺^[37]。

多层膜叠加工艺是在基片上的第一层金属上的指定位置依次制备特定形状的绝缘薄膜层和金属薄膜层,以保证谐振腔不短路的情况下将不同区域的地电极做等电势连接。而空气桥工艺(图6)则将多层膜工艺中的绝缘层薄膜替换为特定的工艺光刻胶,最后将光刻胶去掉,完成悬空金属桥的搭建。较之多层膜叠加工艺,空气桥工艺的一大优势是消除了多层膜叠加工艺中叠放在谐振腔上的绝缘薄膜层在谐振腔中形成的介电损耗。但大量的空气桥也可能会改变超导电路的结构,使谐振腔的特性与品质因子偏离设计^[38]引起结构损耗,也就是说空气桥虽然可以解决多层膜叠加工艺中绝缘层的介电损耗问题,但实际上与空气桥分布、数目、尺寸等相关的结构损耗仍然存在,而这种结构性的损耗也会给超导量子芯片带来负面的影响。

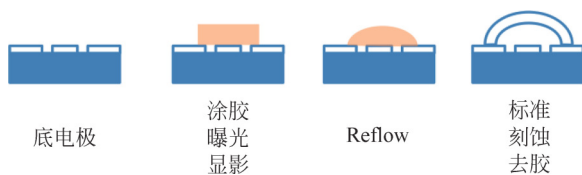


图6 空气桥制备工艺示意图

6 Xmon 量子比特

在全球的超导量子计算竞赛中取得优胜的关键是更长的超导量子比特芯片相干时间与同芯片上更多的比特数目,从上面的讨论可以看到由材料本身缺陷引起的各类损耗是导致超导量子比特芯片退相干的一个主要原因^[39],随着芯片上超导量子比特数目的增加这些损耗带来的负面影响显得更加明显。与此同时,由于对超导量子比特的测控主要依赖于微波,因此在极低温背景环境下的单光子功率量级微波,受到源于基片-金属(S-M)、金属-空气(M-A)和基片-空气(S-A)界面的两能级系统(TLS)缺陷引起的微波损耗严重制约了微波测控的效果^[40]。由于在上述不同材质的界面交叠处,实际的芯片金属材料与空气接触的面积最大,因此生长在金属薄膜材料上的天然氧化物是超导电路微波损失的主要贡献者^[41]。以金属铌单质薄膜超导量子比特芯片为例,可以利用氢

氟酸(HF)去除铌膜表面的有害氧化物,实验表明该方法的优化效果非常明显,最多可使同一个器件的微波谐振腔内部Q因子增加7倍(从 1×10^6 增加到 7×10^6)^[42]。

另一方面,实验中发现利用氮化钛(TiN)薄膜制备的微波谐振腔拥有较高的Q值,因此在实验上初步发展出了一套利用氮化钛薄膜防治铌金属表面氧化物污染的方法,即在超高真空磁控溅射生长金属铌单质薄膜后立即磁控溅射生长一层较薄的氮化钛(TiN)薄膜以保护铌的表面阻止氧化层的形成,实验上也取得了良好的效果^[43]。可以看到,由于后期处理时不可避免地将芯片暴露于空气中无法避免处理后的再次污染,想要达到理想的“State of The Art”超导量子比特芯片制备工艺水平,除了后期清理金属薄膜表面氧化层外,更重要的一个方面是如何去在前期抑制氧化层的形成,而这方面的研究还有很多可以去做。

与金属铌同为族的金属钽拥有同条件下薄膜表面平整度好、材料自身电感低等特点。从理论上讲,这些特点可以进一步降低金属薄膜中准粒子激发的概率^[44]。而且从工艺上看,钽与其他常用金属相比有更低的蚀刻速率,对氧化物更好的蚀刻选择比,因此在微纳加工过程中更容易精确掌控^[24]。鉴于上述特性,钽金属薄膜芯片方案有望在器件性能上取得更大的进展。

如图7所示,中国科学院物理研究所利用金属铌单质薄膜为基底制备的超导量子比特芯片,采用上文中所讨论的超高真空磁控溅射生长高质量金属铌薄膜,利用激光直写与无毒干法刻蚀工艺配合,实现了精度高、稳定性好的图形转移过程,后续的双层电子束光刻胶结合电子束曝光工艺获得了性能稳定性优于90%的多约瑟夫森结阵列,此外利用特殊的光刻胶去除工艺以100%的成功率制备了千余条空气桥。系统的测试表明,该芯片上超导量子比特的最长能量弛豫时间达到了 $40\mu\text{s}$,单量子比特门操作的保真度可达99.97%,多比特之间相互串扰程度小于1%,全部量子比特均可有效相互耦合与独立操控。这种优良的特性使该器件可以满足一定规模超导量子计算实验的要求^[19]。

7 结语

本文按照实现超导量子比特芯片的顺序讨论

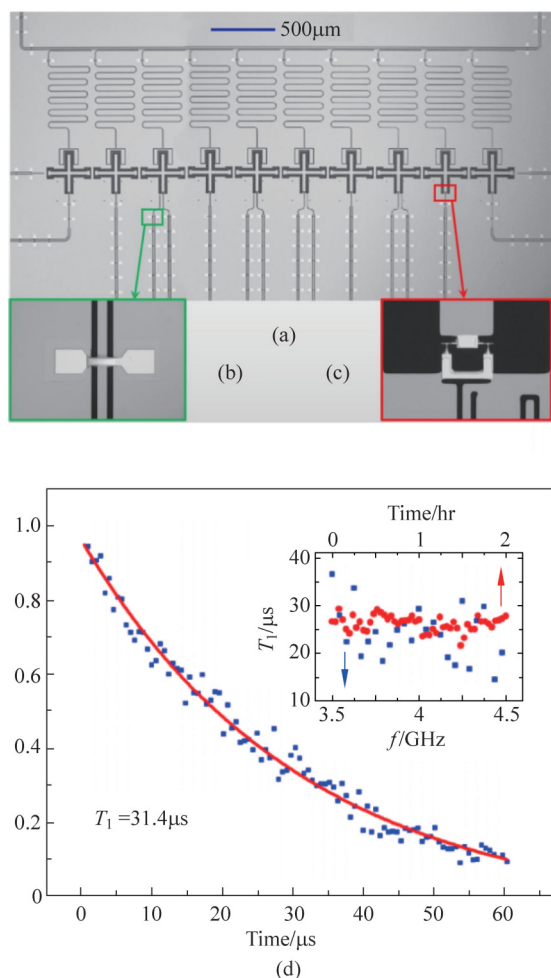


图7 铌基底超导量子比特光学照片与特性测量结果
(a) 金属铌单质薄膜耦合10比特芯片中心区域光学照片；(b) 空气桥光学显微镜照片；(c) 含两个相同约瑟夫森结的 SQUID 区域；(d) 芯片上超导量子比特能量弛豫时间测量结果^[19]

了其微纳加工过程,对每一个步骤的细节和工艺特点做了较为详细的讨论。最后展示了根据所讨论的微纳加工方法所制备的超导量子比特芯片,系统的实验标定表明芯片可以满足一定规模的超导量子计算实验需求,同时也证明了本文所讨论实现超导量子比特芯片微纳加工方法的可靠性。

目前超导量子比特芯片上的超导量子比特数目已经达到110个以上,如果将如此多的超导量子比特数目设计在一个平面芯片上,无疑会增加芯片的体积从而对产生极低温工作环境的制冷机提出更高的要求,更重要的是,数目如此多的超导量子比特需要的测控超导电路如果设计在一个平面芯片上,它们相互之间的相互干扰将严重地影响测控,鉴于众多的量子比特数目与复杂的设计,

空气桥跨导已经不能妥善地解决问题。为突破这个发展瓶颈,研究者借鉴了传统半导体芯片加工的3维封装技术,在该方法中将超导量子比特设计、制备在一个二维平面上(Q-chip),而将测控线路设计、制备在另一个二维平面上(C-chip),通过如图8所示的“倒装焊”方法将两个二维平面键合在一起,并通过空间电磁耦合来实现对超导量子比特的测控。实验证明,倒装焊工艺可以极大程度地解决多超导量子比特之间的串扰,而且不存在空气桥工艺有可能引起的结构损耗问题。但是“倒装焊”工艺也有一些可以改进的空间,例如两个二维平面键合时候需要使用钢来实现压焊,钢与铝之间会形成一个融合层产生大量的准粒子从而引起损耗。此外由于金属铝质地较软,当钢柱从上面脱落的时候容易将铝膜撕扯下来从而损坏超导电路。从这个角度来说,利用铌或钽取代铝制备3维封装的超导量子比特芯片是一个很好的解决办法,目前已经有多家单位在沿着这个技术路线努力,有望在近期实现比特数目150个以上、比特寿命百微秒量级的新一代超导量子比特芯片。

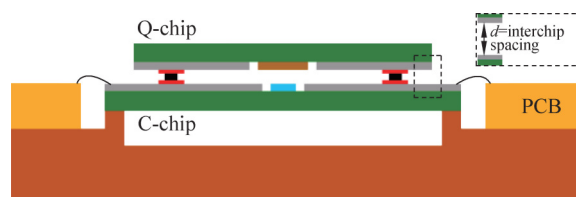


图8 倒装焊工艺结构示意图^[45]

除上文中所讨论的超导量子比特芯片外,极低温的信号放大器在超导量子计算中也是必不可少的。由于超导量子比特芯片工作在100mK以下的温度环境中,当量子非破坏测量方式的微弱读出信号从这样一个极低温的环境中向室温环境传输的时候,很容易在信号中掺杂环境噪声,而市面上的一般微波信号放大器又无法在极低温的环境中以接近量子极限噪声的水平工作,因此需要一种可在极低温环境下,接近量子极限噪声水平的放大器来在信号刚刚从超导量子比特上读出时就将其进行放大以减少环境中噪声对读出信号的影响。本系列的下一篇文章就将系统地讨论这类极低温信号放大器的原理以及实现方法。

最后,借用向涛院士针对量子计算发展所谈到的一句话来作总结:“量子计算的研究还有很长

的路要走,但不管怎么样,量子计算技术的发展是一个趋势,受到了包括中国、美国在内的世界各国的高度重视。最近几年,量子计算的研究,进展非常快。总之,在应用方面,基于固态的量子计算技术的发展,也是凝聚态物理研究的重要方面,其发展可能会改变人类的未来!”

参 考 文 献

- [1] 宿非凡,杨钊华,范桁等. 超导量子比特[J]. 大学物理, 2021, 40: 7-14.
SU F F, YANG Z H, FAN H, et al. Superconducting qubit [J]. College Physics, 2021, 40: 7-14. (in Chinese)
- [2] MARTINIS J M, MEGRANT. UCSB final report for the CSQ program: Review of decoherence and materials physics for superconducting qubits[J]. ArXiv: 1410. 5793 [quant-ph]
- [3] SU F F, LIU W Y, XU H K, et al. Superconducting phase qubits with shadow-evaporated Josephson junctions [J]. Chin. Phys. B, 2017, 26: 060308.
- [4] GAMBETTA J M, MURRAY C E, FUNG Y K K, et al. Investigating surface loss effects in superconducting transmon qubits[J]. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017, 27: 1.
- [5] BLOK M S, RAMASESH V V, SCHUSTER T, et al. Quantum information scrambling in a superconducting qutrit processor[J]. arXiv:2003.03307v1 [quant-ph]
- [6] VISSERS M R, GAO J, WISBEY D S, et al. Low loss superconducting titanium nitride coplanar waveguide resonators[J]. Appl. Phys. Lett. 2010, 97: 232509.
- [7] PREMKUMAR A, WEILAND C, HWANG S, et al. Microscopic relaxation channels in materials for superconducting qubits[J]. arXiv:2004.02908v1 [quant-ph]
- [8] EARNEST C T, BÉJANIN J H, McCONKEY T G, et al. Substrate surface engineering for high-quality silicon/aluminum superconducting resonators[J]. Supercond. Sci. Tech. 2018, 31: 125013
- [9] 宿非凡,杨钊华. 超导量子比特谱[J]. 物理与工程, 2021, 31(6): 73-83, 96.
SU F F, YANG Z H. Superconducting qubit spectrum[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(6): 73-83, 96. (in Chinese)
- [10] LIU W Y, XU H K, SU F F, et al. Coupled superconducting qubit-resonator system: Energy spectrum, state population, and state transition under microwave drive[J]. Phys. Rev. B, 2018, 97: 094513.
- [11] SWINGLE B, KARAMLOU A H, YANAY Y. Probing quantum information propagation with out-of-time-ordered correlators[J]. Nat. Phys. 2018, 14: 988.
- [12] SALATHÉ Y, MONDAL M, OPPLIGER M, et al. Digital quantum simulation of spin models with circuit quantum electrodynamics[J]. Phys. Rev. X 2015, 5: 021027.
- [13] BARENDT R, LAMATA L, KELLY J, et al. Digital quantum simulation of fermionic models with a superconducting circuit[J]. Nat. Commun. , 2015, 6: 7654.
- [14] ZHONG Y P, XU D, WANG P, et al. Emulating anyonic fractional statistical behavior in a superconducting quantum circuit[J]. Phys. Rev. Lett. 2016, 117: 110501.
- [15] FLURIN E, RAMASESH V V, HACHOEN-GOURGY S, et al. Observing topological invariants using quantum walks in superconducting circuits[J]. Phys. Rev. X 2017, 7: 031023.
- [16] KJAERGAARD A, SCHWARTZ M E, BRAUMÜLLER J, et al. Superconducting qubits: Current state of play[J]. Ann. Rev. Cond. Matter Phys. 2020, 11: 369.
- [17] KREIKEBAUM J M, DOVE A, LIVINGSTON W, et al. Optimization of infrared and magnetic shielding of superconducting TiN and Al coplanar microwave resonators[J]. Supercond. Sci. Tech. 2016, 29: 104002.
- [18] SEGALL K, CRANKSHAW D, NAKADA D, et al. Impact of time-ordered measurements of the two states in a niobium superconducting qubit structure[J]. Phys. Rev. B 2003, 67: 220506.
- [19] SU F F, YANG Z H, ZHAO S K, et al. Observation of the exceptional point in superconducting qubit with dissipation controlled by parametric modulation[J]. Chin. Phys. B 2021, 30: 100304.
- [20] PREMKUMAR A, WEILAND C, HWANG S. Microscopic relaxation channels in materials for superconducting qubits[J]. Commun Mater 2021, 2: 72.
- [21] CAVA R J, BATLOGG B, KRAJEWSKI J J, et al. Electrical and magnetic properties of Nb₂O₅- δ crystallographic shear structures[J]. Phys. Rev. B 1991, 44: 6973.
- [22] VERJAUW J, POTOČNIK A, MONGILLO M, et al. Investigation of microwave loss induced by oxide regrowth in High-Q Niobium resonators [J]. Phys. Rev. Applied, 2021, 16: 014018.
- [23] GLADCZUK L, PATEL A, PAUR C S, et al. Tantalum films for protective coatings of steel[J]. Thin Solid Films, 2004, 467: 150.
- [24] PLACE A P M, RODGERS L V H, MUNDADA P, et al. New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds[J]. Nat. Comm. , 2021, 12: 1779.
- [25] OHYA S, CHIARO B, MEGRANT A, et al. Room temperature deposition of sputtered TiN films for superconducting coplanar waveguide resonators[J]. Supercond. Sci. Tech. , 2014, 27: 015009.
- [26] LISENFELD J, BILMES A, MEGRANT A, et al. Electric field spectroscopy of material defects in transmon qubits[J]. npj Quantum Info. , 2019, 5: 105.
- [27] PICKARD C J, ERREA I, EREMETS M I. Superconducting hydrides under pressure[J]. Ann. Rev. Condens. Matter Phys. , 2020, 11: 57.

- [28] LOCK E H, XU P, KOHLER T, et al. Using surface engineering to modulate superconducting coplanar microwave resonator performance[J]. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2019, 29: 1700108.
- [29] LEONARD E, BECK M A, NELSON J, et al. Digital coherent control of a superconducting qubit[J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2019, 11: 014009.
- [30] SU F F, YANG Z H, ZHAO S K, et al. Fabrication and characterization of superconducting multiqubit device with niobium base layer[J]. *Chin. Phys. B*, 2021, 30: 100304.
- [31] 宿非凡, 杨钊华. 约瑟夫森效应与超导量子电路的基本物理原理[J]. *物理与工程*, 2021, 31(5): 28-33.
SU F F, YANG Z H. Josephson effect and the basic physical principles of superconducting quantum circuits [J]. *Physics and Engineering*, 2021, 31(5): 28-33. (in Chinese)
- [32] DOLAN G J. Offset masks for lift-off photo processing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, 31: 337.
- [33] CAI N, ZHOU G, MÜLLER K, et al. Temperature and pressure dependent Mott potentials and their influence on self-limiting oxide film growth [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101: 171605.
- [34] AMBEGAOKAR V, BARATOFF A. Tunneling between superconductors[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1963, 10: 486.
- [35] BILMES A, NEUMANN A K, VOLOSHENIUK S, et al. In-situ bandaged Josephson junctions for superconducting quantum processors[J]. *arXiv:2101.01453v2 [quant-ph]*
- [36] OSMAN A, SIMON J, BENGTSSON A, et al. Simplified Josephson-junction fabrication process for reproducibly high-performance superconducting qubits[J]. *arXiv:2011.05230v1 [cond-mat. sup-con]*
- [37] WOODS W, CALUSINE G, MELVILLE A, et al. Determining interface dielectric losses in superconducting Coplanar-Waveguide resonators[J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2019, 12: 014012.
- [38] ROSENBERG D, WEBER S J, CONWAY D, et al. Solid-state qubits: 3D integration and packaging[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2020, 21: 72.
- [39] MÜLLER C, COLE J H, J. LISENFELD. Towards understanding two-level-systems in amorphous solids: insights from quantum circuits[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2019, 82: 124501.
- [40] WANG C, AXLINE C, GAO Y Y, et al. Surface participation and dielectric loss in superconducting qubits [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 107: 162601.
- [41] BARENDTS R, VERCRUYSEN N, ENDO A, et al. Superconducting quantum bits[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97: 023508.
- [42] VERJAUW J, POTOČNIK A, MONGILLO M, et al. Investigation of microwave loss induced by oxide regrowth in High-Q Niobium resonators [J]. *Phys. Rev. Applied*, 2021, 16: 014018.
- [43] LEDUC H G, BUMBLE B, DAY P K, et al. Titanium nitride films for ultrasensitive microresonator detectors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97: 102509.
- [44] GLADCZUK L, PATEL A, PAUR C S, et al. Tantalum films for protective coatings of steel[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 467: 150.
- [45] KOSEN S, LI H X, ROMMEL M, et al. Building blocks of a flip-chip integrated superconducting quantum processor [J]. *arXiv:2112.02717v1 [quant-ph]*