

铌基超导量子比特及辅助器件的制备

宿非凡 杨钊华 赵寿宽 严海生 田野 赵士平

Fabrication of superconducting qubits and auxiliary devices with niobium base layer

Su Fei-Fan Yang Zhao-Hua Zhao Shou-Kuan Yan Hai-Sheng Tian Ye Zhao Shi-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 050303 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211865

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211865>

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

新型超导量子比特及量子物理问题的研究

Novel superconducting qubits and quantum physics

物理学报. 2018, 67(22): 228501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180845>

基于超绝热捷径技术快速制备超导三量子比特Greenberger–Horne–Zeilinger态

Superadiabatic scheme for fast generating Greenberger–Horne–Zeilinger state of three superconducting qubits

物理学报. 2019, 68(3): 030302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181922>

基于辅助单比特测量的量子态读取算法

A quantum state readout method based on a single ancilla qubit

物理学报. 2021, 70(21): 210303 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211066>

高功率转换效率905 nm垂直腔面发射激光器的设计与制备

Design and fabrication of 905 nm vertical cavity surface emitting laser with high power conversion efficiency

物理学报. 2021, 70(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210043>

硅和锗量子计算材料研究进展

Research progress of silicon and germanium quantum computing materials

物理学报. 2021, 70(21): 217802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211492>

低噪声超导量子干涉器件磁强计设计与制备

Design and fabrication of low-noise superconducting quantum interference device magnetometer

物理学报. 2019, 68(13): 138501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190483>

综述

铌基超导量子比特及辅助器件的制备*

宿非凡¹⁾ 杨钊华¹⁾²⁾ 赵寿宽¹⁾²⁾ 严海生¹⁾²⁾ 田野¹⁾ 赵士平^{1)2)†}

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

(2021 年 10 月 8 日收到; 2021 年 11 月 5 日收到修改稿)

近年来超导量子计算的研究方兴未艾, 随着谷歌宣布首次实现“量子优势”, 这一领域的研究受到了人们进一步的广泛关注. 超导量子比特是具有量子化能级、量子态叠加和量子态纠缠等典型量子特性的宏观器件, 通过电磁脉冲信号控制磁通量、电荷或具有非线性电感和无能量耗散的约瑟夫森结上的位相差, 可对量子态进行精确调控, 从而实现量子计算和量子信息处理. 超导量子比特有着诸多方面的优势, 很有希望成为普适量子计算的核心组成部分. 以铌或其他硬金属 (如钽等) 为首层大面积材料制备的超导量子比特及辅助器件 (简称铌基器件) 拥有其独特的优点以及进一步发展的空间, 目前已引起越来越多的兴趣. 本文将介绍常见的多种超导量子比特的基本构成和工作原理, 进而按照器件加工的一般顺序, 从基片选择和预处理、薄膜生长、图形转移、刻蚀和约瑟夫森结的制备等方面详细介绍铌基超导量子比特及其辅助器件的多种制备工艺, 为超导量子比特的制备提供一个可借鉴的清晰的工艺过程. 最后, 介绍若干制备铌基超导量子比特与辅助器件的具体例子, 并对器件制备的工艺与方法的优化做展望.

关键词: 超导量子比特, 器件制备, 量子计算**PACS:** 03.67Lx, 85.25Cp**DOI:** 10.7498/aps.71.20211865

1 引言

超导量子比特是以非线性无损耗的约瑟夫森结为核心, 具有宏观量子效应的器件, 具有能耗低、比特数易扩展、量子态调控和读取方便、量子退相干时间呈现不断提高的特点, 目前已成为最有希望实现普适量子计算的方案之一^[1–5]. 超导量子比特在过去的二十多年时间中, 经历了位相量子比特、电荷量子比特、磁通量子比特和传输子 (transmon) 量子比特等器件结构和量子退相干时间的发展和深入研究, 器件结构和制备工艺日趋成熟. 近年来发展起来了一系列器件制备方法, 其主流工艺包括在蓝宝石或高阻硅基片上制备铝膜基底, 并结合干法刻蚀或湿法刻蚀和双角度蒸发约瑟夫森结等工

艺, 基于这些工艺制备的超导量子比特器件已成功应用于丰富的物理^[6–22]、化学^[23–27]、生物学^[28]、机器学习^[29,30]和金融^[31,32]等领域的研究中.

另一方面, 在蓝宝石或高阻硅基片上以 VB 族金属材料铌 (或钽) 为基底来制备超导量子器件 (以下统称铌基器件), 能方便电子束曝光制备图形时的定标、可采用更稳定的干刻工艺、易于器件的反复超声点焊引线 and 约瑟夫森结电阻的室温测量, 也具有简化立体封装工艺的潜力, 因而在超导量子比特及其辅助器件的制备方面受到了越来越多的重视, 目前已为 IBM^[33]、Princeton^[34]、Berkeley^[35]、MIT^[36]、ETH^[37]、中国科学院物理研究所^[38–41]和北京量子信息科学院^[42]等多个国际国内研究所采用. 本文首先简单讨论多种超导量子比特器件的构成和基本工作原理, 接着从基片的选择和预处

* 国家自然科学基金 (批准号: 11874063) 和广东省重点领域研发计划 (批准号: 2018B030326001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: spzhao@iphy.ac.cn

理、薄膜生长、图形转移、干法刻蚀、约瑟夫森结的蒸发等方面详细介绍以铌薄膜为基底的超导量子比特及其辅助器件的制备工艺, 最后介绍多种超导量子比特器件的制备和测量结果, 并对今后的发展作展望. 本文对现有的铌基超导量子比特的制备工艺进行梳理, 为今后相关领域研究的进一步发展, 以及继续提高超导量子比特的特性及其规模化扩展提供一定的参考.

2 超导量子比特的构成与工作原理

历史上人们提出的超导量子比特的设计方案包括最初的超导电荷量子比特 (charge qubit)^[9]、磁通量子比特 (flux qubit)^[43] 和位相量子比特 (phase qubit)^[44], 后来发展出目前常见的传输量子

子比特^[45–47]、fluxonium^[48] 和 C-shunt flux qubit^[49] 等, 以下简单介绍这些超导量子比特的构成与工作原理.

早期的电荷量子比特、磁通量子比特与位相量子比特的等效电路与能级特征如图 1 所示^[50], 这 3 种量子比特现在已基本淡出人们的视线 (其中磁通量子比特仍在绝热量子计算方案中被使用^[51]), 作为历史沿革, 下面进行原理性概述. 电荷量子比特的设计是将约瑟夫森结与门电容串联而构成一个如图 1(a) 中红色部分所表示的库珀对盒^[9] (Cooper pair box), 通过门电压偏置可以改变库珀对盒上库珀对的数目, 从而形成一个周期势. 如果电容的充电能 E_C 远大于约瑟夫森耦合能 E_J , 周期势主要由充电能决定的不同库珀对数对应的抛物线型势构成, 不同抛物线的交叉处由于约瑟夫森耦合能

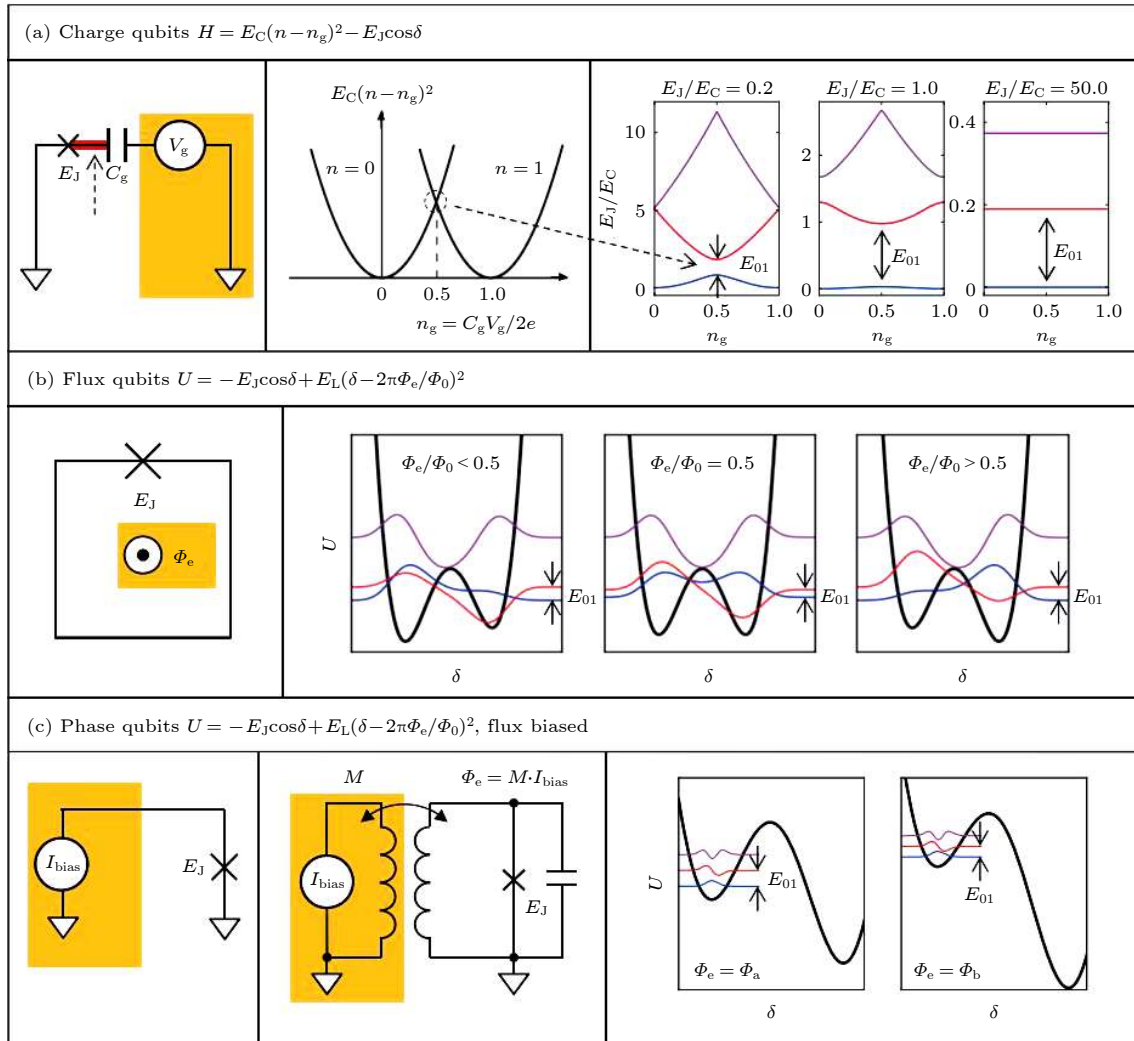


图 1 早期 3 种超导量子比特的电路模型、势能和能级图^[50] (a) 电荷量子比特; (b) 磁通量子比特; (c) 位相量子比特

Fig. 1. Circuit diagram, potential energy and energy levels of three superconducting qubits: (a) Charge qubit; (b) flux qubit; (c) phase qubit^[50].

的存在会产生免交叉, 电荷量子比特即工作在门电压偏置于某个免交叉点附近. 磁通量子比特则由一个含 (若干) 约瑟夫森结的电感 L 的超导环组成^[43], 如图 1(b) 所示. 这一系统的势能曲线一般是一个双阱势, 两阱底部的相对高度和两阱间的势垒高度都可通过选择合适的参数调整, 粒子在两个阱中分别对应超导环中的两个不同的环流方向, 当势垒高度足够低时可组成叠加态, 系统的两个最低能级即可作为量子比特的 0 态和 1 态. 位相量子比特与磁通量子比特的设计类似, 如图 1(c) 所示. 通常该设计中使用含一个面积较大的约瑟夫森结的超导回路^[42], 因此具有较大的约瑟夫森耦合能 E_J . 利用磁通 (电流) 进行偏置, 可使体系形成一搓衣板状势阱, 选择合适的参数可使势阱中保留合适的能级个数, 其中最低的两个能级便可作为量子比特 0 态和 1 态. 概括起来看, 这 3 种超导量子比特分别采用了不同大小的约瑟夫森耦合能 E_J 和电容充电能 E_C 之间的比值^[50,52], 具体来说, 对电荷量子比特该比值约为 0.1, 而磁通量子比特与位相量子比特的比值范围分别在 $10-100$ 与 10^4-10^6 之间.

通过实验发现, 电荷噪声会导致量子退相干从而影响量子比特的性能. 为提升量子比特的性能, 在电荷量子比特的基础上, 通过增大 E_J/E_C 来减小量子比特能级间距随电荷数的变化而发生的影响, 从而降低电荷噪声的影响 (见图 1(a) $E_J/E_C =$

50.0 时的能谱). 传输子超导量子比特便应运而生, 其对电荷噪声的不敏感性使其量子相干时间有了长足的提高^[45]. 传输子量子比特通常是一个电路量子电动力学系统, 即量子比特和谐振腔的耦合系统, 而目前实验上常用的量子比特 (如传输子量子比特) 是含有两个约瑟夫森结组成的超导量子干涉器件 (SQUID), 可以通过改变 SQUID 环中的磁通大小来改变约瑟夫森结的总临界电流, 使 E_J 发生变化^[50], 从而二能级系统的能级间距可以通过外加磁通来调节. 此外, 这类传输子量子比特通过电容与一个半波谐振腔耦合, 既通过 Purcell 效应有效地压制了由自发辐射引起的量子态的弛豫^[53], 也可以在色散区通过测量谐振腔的传输特性来获得量子比特的状态. 这样的测量方法对量子比特因测量操作而引起的量子退相干很小, 加上第一级约瑟夫森参量放大器的使用, 可以实现非破坏性的量子态单发测量. 传输子量子比特有效地提高了样品的量子相干时间, 截止到 2017 年最长可达到 $94\ \mu\text{s}$ ^[54], 目前多个研究组已经突破百微秒量级. 但最初的设计较难将量子比特数目加以扩展. 基于传输子量子比特的设计思路, IBM、耶鲁大学等单位的研究者进一步发展了不同的样品设计也取得了很好的结果^[45,54].

Martinis 团队^[47] 于 2013 年报道了一种对传输子量子比特的改良设计, 如图 2 所示, 由于该设计的交叉形特征, 故该团队将其命名为 Xmon

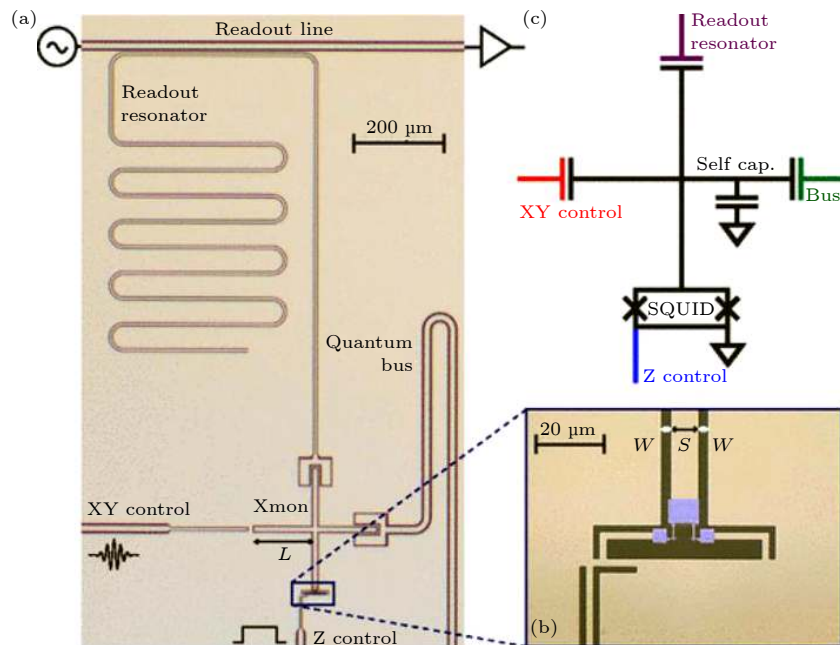


图 2 Xmon 超导量子比特^[47] (a) 器件照片; (b) 约瑟夫森结区放大图; (c) 电路示意图

Fig. 2. Superconducting Xmon qubit^[47]: (a) Optical micrograph; (b) magnified view of Josephson-junction area; (c) circuit diagram.

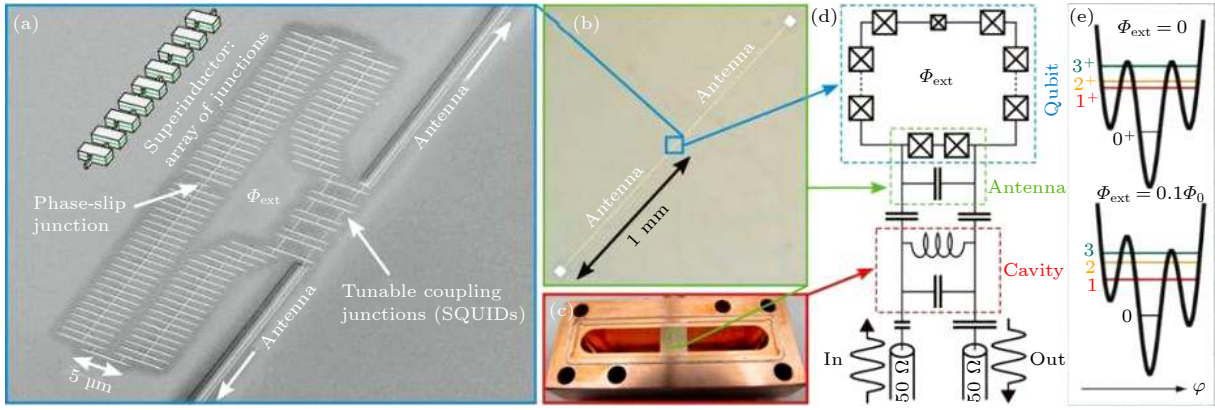


图 3 Fluxonium 量子比特^[48] (a) 器件照片; (b) 天线; (c) 3D 腔; (d) 电路示意; (e) 势能和能级示意图

Fig. 3. Superconducting fluxonium qubit^[48]: (a) Optical micrograph; (b) antenna; (c) 3D resonator; (d) circuit diagram; (e) potential energy and energy levels.

量子比特. 这类器件结构将原来与约瑟夫森结组合成非线性谐振电路电容的一端变为地端, 而电容另一端设计为十字叉形, SQUID 位于在叉子形的下端. 这种设计使得利用直流偏置 (Z 线) 调制 SQUID 变得方便、直接, 而十字叉的另外三端可以分工明确, 分别与读出谐振腔、微波控制线 (XY 线)、以及其他量子比特相耦合. 这种设计使比特数目的扩展非常方便, 目前已广泛地应用于各种量子计算和量子模拟的研究中, 例如采用这种设计 Google 成功实现了量子优势和对时间晶体的观察. Xmon 量子比特的退相干时间最初达到 $40\ \mu\text{s}$ 左右, 虽然较前面提到的传输子量子比特略显逊色, 但在后续的制备工艺研究中发现, 其量子退相干时间仍有较大的提升空间.

除上述超导量子比特设计之外, 图 3 所示的 fluxonium 量子比特在磁通量子比特设计中将用一串约瑟夫森结组合而实现自感较大的电感并将该大电感并联在小面积约瑟夫森结旁, 由于引入了较大电容, 该设计对电荷噪声不敏感, 再加之可以抑制准粒子激发的特点, 使该设计的样品退相干时间达到了毫秒量级^[55].

类似如图 4 所示, 并联电容磁通量子比特 (C-shunt flux qubit) 也是以磁通量子比特为基础蓝本, 将一个较大的电容并联在小面积约瑟夫森结旁, 再通过电容耦合谐振腔实现操纵、读出^[49]. 该设计使得体系势能函数将电荷量子比特和磁通量子比特的特性结合起来, 势能曲线最终呈现四次函数的形式^[49], 而该能级结构使得电容分流磁通量子比特拥有较传输子量子比特更大的非线性, 该器件的退相干时间可达 $40\ \mu\text{s}$ 左右.

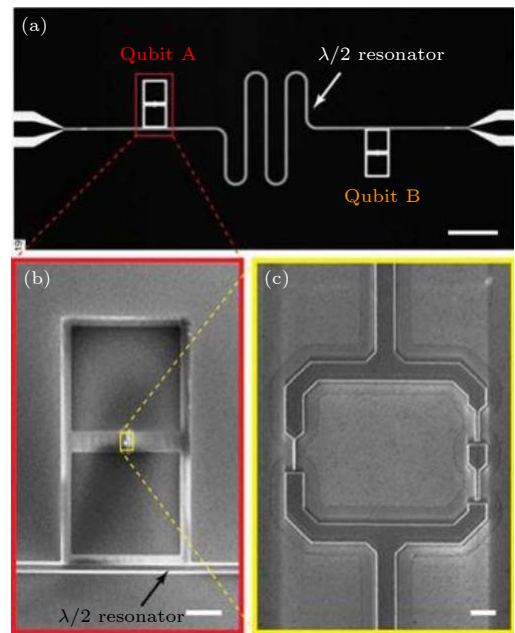


图 4 并联电容磁通量子比特^[49] (a) 样品基本结构; (b) 电容部分; (c) 约瑟夫森结部分

Fig. 4. C-shunt flux qubit^[49]: (a) Device structure; (b) capacitor area; (c) Josephson-junction area.

多年来人们通过对超导量子比特器件的材料、结构和制备工艺方面的深入研究, 逐渐完善了对提升器件性能的关键因素的认知, 采用不同材料的量子比特其量子相干时间得到了很大的提升^[42]. 下面将系统介绍以铌为代表的 VB 族金属作为超导量子比特首层材料时的制备工艺方面的研究和进展.

3 铌基超导量子比特的基本制备工艺

3.1 基片的选择以及预处理

Martinis 团队^[56]在 2014 年对介质介电损耗、

约瑟夫森结与电感的损耗、器件辐射损耗等进行了系统的总结,通过系统研究、比较常用衬底材料损耗,发现高阻硅和蓝宝石两种基片具有最小的介电损耗,这意味着以这两种材料为基片制备的谐振腔可有更高的品质因子,因此目前的超导量子比特制备工艺大多都选取这两种材料作为工艺基片.

在选定基片以后,需要对基片进行一定的预处理才可以在基片上进行铌膜的生长. 清洁基片表面的方法与半导体工艺类似,包括化学方法(蚀刻、钝化等)和物理方法(离子铣削、热处理等). 基本的处理方法是利用分析纯级的丙酮、异丙醇、去离子水对基片进行超声清理,以去除基片表面的有机物以及落灰等杂质^[38,45–50,54–59]. 为进一步去除高阻硅与蓝宝石基片上存在的氧化层以及牢固附着有机物,可以利用氢氟酸(HF)对基片进行2 min的漂洗^[60,61],或者利用硫酸与双氧水以2:1体积比配制的“食人鱼”试剂在120 °C下浸泡10 min,再在75 °C、体积比 $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 为1:1:5的混合液静置10 min后,利用1%浓度的HF清洗1 min,亦可以取得相似的效果^[35,62–66]. 研究指出,上述清洗过程可以有效减少硅基底表面的氧化物污染,从而减少谐振腔中的介电损失^[67]而提高样品谐振腔 Q 值,在不具备上述化学清洗的实验条件时利用离子铣的方法对基片进行清洗也可以作为一种可提高样品谐振腔 Q 值的简易处理方法^[68,69]. 此外有研究证实,通过使用六甲基二硅氮(HDMS)对硅基底表面进行钝化从而形成疏水表面,亦可以减轻硅基片与后续金属薄膜之间的界面损失,从而得到更高的谐振器品质因子^[63,70,71].

接下来,在生长金属薄膜之前通常还会对蓝宝石基片进行温度200–1000 °C,时间从20 min到数小时的加热退火,该操作既有助于去除蓝宝石基片上的有机残余物,也有助于提高基片与金属薄膜层之间界面的质量^[72,73]. 对于高阻硅基片,高温加热可以减少基片的氧化污染物,从而改善谐振器的品质因子^[74],但是需要注意的是,温度高于950 °C会使硅基片表面粗糙度显著增大导致谐振腔品质因子变小.

3.2 铌薄膜的生长与特性

高纯金属单质或合金超导体的多种金属薄膜已被用于超导量子比特的制备之中,金属薄膜中的

杂质和缺陷对制备器件的性能有显著的负面影响,因此金属薄膜的制备工艺在超导量子比特的制备中占有极重要的位置. 目前常见的金属薄膜生长方法有磁控溅射、分子束外延与电子束蒸发3种,针对不同的金属选取不同的生长方式可获得较好的效果^[56]. 目前最主流的金属基底材料为铝,所制备的超导量子比特已有很多实际应用^[10–22,75]. 生长金属铝的工艺较多,这些工艺各有优势,例如分子束外延(MBE)可以产生平坦薄膜,但速度比物理或化学气相沉积相关的慢得多. 随着超导量子比特性能的不断提^[3,76],注意到由于金属铝的超导转变温度大约为1.2 K,所以铝材料更容易由于较低超导能隙而受到测量环境的影响,也就是说金属铝的内在特性可能限制了超导量子比特的性能进一步提高^[77]. 在超导物理中,金属铌是另外一种较为熟悉的金属材料^[78,79],其超导转变温度约为9.2 K,有很高的临界磁场,且如前所述,采用铌作超导量子器件的首层材料有多方面的优势. 对于金属铌,一般采用超高真空磁控溅射的方法生长,在常规的磁控溅射生长过程中主要需要控制溅射的背景真空、工艺气体工作气压与射频电源溅射功率并在室温环境中进行溅射^[39],这种方法可以获得纯净的金属铌薄膜,其超导临界温度、晶格常数与纯净金属铌块材基本相同. 为了进一步提高生长金属铌薄膜的质量,研究人员对磁控溅射的条件进行了探索,有报道指出磁控溅射工艺的稳恒电离电压用短、高功率脉冲所取代(high-power impulse magnetron sputtering, 即HiPIMS工艺)可生长出更加致密的薄膜^[72],在后续研究中,研究人员尝试了不同的脉冲形式(HiPIMS opt, HiPIMS norm),得到了如表1所列的结果.

如图5所示,利用AFM观察发现,HiPIMS工艺制备的铌膜较之普通的磁控溅射方法生长的铌膜拥有更加小的晶粒尺寸. HiPIMS生长的铌膜较之溅射法生长的铌膜有更小的晶粒,较低的填充密度,这就导致了较为明显的晶界空洞从而导致氧化物深入薄膜. 研究指出,这种氧化物可以深入铌膜约20 nm,考虑到铌在6 GHz的穿透深度为60 nm,这些氧化物可以引起较大的损耗^[72]. 从图5与表1可以看出,优化后的HiPIMS opt生长方法比HiPIMS norm生长方法有更大尺寸的晶粒,从而减小了上述损耗.

表 1 不同生长模式制备的铌薄膜器件性质^[72]
Table 1. Properties of niobium thin film devices with different growth modes^[72].

Deposition	Sputtered	HiPIMS opt	HiPIMS norm
$T_1/\mu\text{s}$	56 ± 12	33 ± 2	17 ± 9
RRR	8.9 ± 0.1	5.0 ± 0.2	2.9 ± 0.1
T_c/K	9.0 ± 0.1	8.6 ± 0.1	8.1 ± 0.1
GSA/ nm^2	1140 ± 70	500 ± 50	180 ± 30
Nb	61 ± 3	64 ± 3	45 ± 2
NbO _x	15.1 ± 0.2	16.0 ± 0.3	20.4 ± 0.8
NbO	0 ± 2	0 ± 1	5 ± 1
NbO ₂	3.1 ± 0.4	3.5 ± 0.2	10 ± 2
Nb ₂ O ₅	20 ± 1	15.9 ± 0.8	19 ± 2
Suboxide	19 ± 2	20 ± 1	36 ± 2

值得注意的是, 相关研究指出利用加热器将溅射环境温度增加至 850 °C 后, 生长的铌膜制备的谐振腔 Q 值有了较大的提升, 在对比磁控溅射、电子束蒸发、分子束外延 3 种生长方法与不同生长工艺后得到了如表 2 的结论^[57], 该研究对铌膜的生长条件有一定的借鉴意义. 由于金属铌薄膜制备的超导量子比特具有不必制备电子束曝光套刻标志、质地坚硬可以直接在室温下测试结区电阻, 反复进行超声点焊、不与碱性显影液发生反应、可能易于扩展到 3 维封装工艺中等优点^[39], 因此对超导量子比特向单芯片更多数目、更长退相干时间的发展

有较重要的意义.

与金属铌 (Nb) 同为 VB 族的金属钽 (Ta) 也具有相对较高的超导转变温度 ($T_c = 4.5 \text{ K}$), 研究表明金属钽表面形成的氧化物比金属铌表面的氧化物拥有更稳定的化学性质^[72,80], 且铌的金属氧化物对以铌为基底的超导量子比特性能有较强的限制^[81,82]. 因此将金属钽用于量子比特的制备可以进一步提高超导量子比特的性能, 目前在蓝宝石基片上生长的钽基底的超导量子比特的能量弛豫时间可达亚毫秒量级^[42,82] (是目前文献报道中最高的). 生长金属钽的工艺与生长金属铌的方法类似, 但在溅射过程中需要仔细控制溅射环境的温度以压制钽金属成膜过程中可能出现的有害 β 相^[83–86].

需要注意的是, 金属薄膜内的应变也会影响超导量子比特的性能^[66,87]. 在实验上可以通过成膜超导材料的超导临界温度 T_c 与材料标准 T_c 的差别来甄别较大的应力存在^[88–90], 并作预先的工艺优化. 虽然金属薄膜内应力影响超导量子比特性能的直接证据仍不十分明确, 但可确定的是在底层基片材料内引起的形变会改变量子比特和 TLS (two-level system) 之间的相互作用^[91–93]. 一般而言, 由于基片和覆盖的金属的热膨胀系数差异, 集中在结构边缘附近的应力在极低温条件下会显示出明显的作用^[94,95].

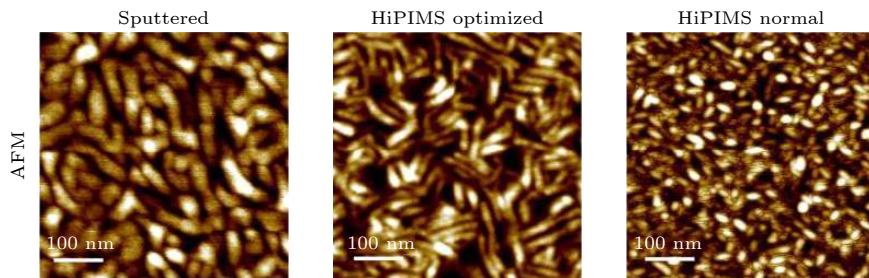


图 5 HiPIMS 工艺制备的铌膜与普通磁控溅射方法生长的铌膜致密性对比^[72]

Fig. 5. Comparison of the density of niobium film prepared by Hipims process with that by conventional magnetron sputtering^[72].

表 2 不同方法生长铌薄膜以及所制备谐振腔的性质^[57]
Table 2. Growth of niobium thin films by different methods and fabricated resonator properties^[57].

Process ^a	In vacuo cleaning	$w/\mu\text{m}$	f_0/GHz	$Q_t\text{-H} \times 10^6$	$Q_t\text{-L} \times 10^6$
(A) Sputter	100 eV Ar ⁺ mill for 2 min	3	3.833	4.30	0.16
		15	6.129	4.50	0.40
(B) E-beam	60 eV Ar ⁺ mill for 2 min	3	3.810	9.90	0.66
		15	6.089	4.40	0.72
(C) MBE	None	6	4.973	5.70	0.53
		15	6.120	4.33	0.76
(D) MBE	LL ^b anneal	3	3.773	6.58	0.75
		15	6.125	5.38	0.80
(E) MBE	LL ^b and 850 °C anneal	3	3.876	10.10	1.15
		15	6.127	6.40	0.92

这部分最后需要指出的是, 蓝宝石基片上 OH^- 和 O_2 与铌膜接触时, 在二者界面将出现自旋极化 [96–98] 并产生 $1/f$ 噪声 [99] 对器件的性能也会产生负面影响, 因此在实验制备的过程中需要注意到各步骤间的联系, 并仔细进行每一个步骤.

3.3 图形的制备

在生长好的铌膜上进行图形转移是一个重要的过程, 考虑到金属化边缘附近存在较高的电场强度与 TLS, 图形线边缘的粗糙度对器件性能有着重要影响 [100,101], 例如对溅射成膜的铌基超导量子比特的研究表明, 利用具有侵蚀性的 SF_6 蚀刻会增加边缘粗糙程度, 从而降低器件谐振腔的品质因子 [70]. 现行的图形转移方法是光刻, 光刻可以分为掩模紫外光刻 [55]、激光直写 (DWL) [39]、电子束曝光 [38,55] (EBL) 3 种方法. 其中精度最高的方法是电子束曝光, 而时间最快的方法是掩模紫外光刻, 而近年来成熟的激光直写系统 (DWL) 兼备高精度、短时间且与多种光刻胶 (S18 $\times\times$ 系列、LOR 系列、SPR 系列、AZ 系列等) 均适配等特点, 利用直径为 2 mm 的激光直写头 (DWL 66+系统) 所制备的光刻图形精度可以达到 200 nm 左右, 足以满足目前制备超导量子比特的工艺要求, 目前一般报道中均使用激光直写工艺进行光刻 [38,39,41,57,82].

对制备好图形的金属薄膜进行刻蚀是图形转移的关键步骤, 通常有干法刻蚀与湿法刻蚀两类工艺路线. 干法刻蚀具有工艺稳定可重复性强的优点, 但干法刻蚀往往需要配套的刻蚀系统, 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. 湿法刻蚀工艺所需的仪器设备简单, 但工艺受环境因素影响较大, 稳定性与可重复性都不及干法刻蚀. 在实验中一般选择毒性低、伤害少的工艺, 例如对于金属铝选用化学湿法腐蚀的方法, 虽然工艺条件不易稳定但可以回避干法刻蚀需要的剧毒气体 [61], 金属铌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 [39,57], 可用稳定的无毒干法刻蚀也是利用铌膜制备超导量子比特的优点之一. 实验证明, 将激光直写与干法刻蚀工艺结合, 可以使得金属薄膜图形边缘起伏在 30 nm 左右, 在图形转移的过程中获得了较好的保真度 [39]. 此外, 在刻蚀的过程中通过对高阻硅基片进行深刻可以将所制备谐振腔的单光子水平内部 Q 值提升至百万的量级 [102]. 在实际实

验中可根据上述结果结合实验需求来综合考虑选制备工艺路线.

3.4 约瑟夫森结的设计与制备

制备超导量子比特核心部件约瑟夫森结的工艺, 基本上采用统一的 PMMA/MMA 双层胶电子束曝光并采用多兰桥结构设计 [103], 或曼哈顿式设计 [104,105] 结合双角度影蒸发工艺. 由于铝的氧化物质地坚固, 钝化性能好且其厚度适合库珀对隧穿, 所以制备约瑟夫森结一般使用金属铝以及铝的氧化物 [106,107]. 铝膜上的氧化物生长速率与温度、氧压和氧化时间有复杂的关系. 在室温情况下, 卡布雷拉-莫特 (Cabrera-Mott) 理论给出了一个简单的物理图像, 由于氧化层形成的过程中, 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, 所以初始氧化速率会较大, 而在后续过程中, 由于隧穿电流随着氧化膜厚度的增大呈指数减小, 这个驱动电场随之减小, 氧化层生长变慢, 当驱动电场不足以使金属的传导电子通过势垒时氧化层将停止生长达到极限厚度 [108]. 有研究证实在沉积上层铝之前, 利用氧等离子体辅助工艺可以使结 J_C 的数值加倍, 并且可以稳定所制备的约瑟夫森结性质 [106]. 另一方面, 安贝戈卡-巴拉托夫 (Ambegaokar-Baratof) 公式 [109] 预测室温下正常态的隧穿电阻 (R_n) 和结面积的乘积与其临界电流密度 J_C 成反比, 这就为通过测量室温约瑟夫森结电阻进而判断其参数是否符合实验要求提供了有效的途径 [110,111].

由于底层金属表面的杂质会阻碍超流的流动, 进而导致超导量子比特的退相干, 所以将铝膜制备的约瑟夫森结与底面金属连接时, 需要消除这些缺陷以实现超导连接, 通常在生长约瑟夫森结下层金属之前通过氩离子铣去除上述杂质 [39]. 另一方面, 系统的研究显示由约瑟夫森结引起的比特缺陷有 40% 位于由双角度影蒸发工艺形成的寄生结内, 剩下的 60% 缺陷在离子铣后仍位于约瑟夫森结与底层金属的接口上, 而约瑟夫森结内部对缺陷的贡献基本是零 [112]. 为减小制备约瑟夫森结引起的缺陷, 可以通过在光刻步骤中巧妙地设计约瑟夫森结与基底金属的连接方式来进行改进, 一些课题组对此进行了研究, 图 6 所示为其中两种改良设计, 经过上述设计改良之后的器件性能均有提升 [112,113].

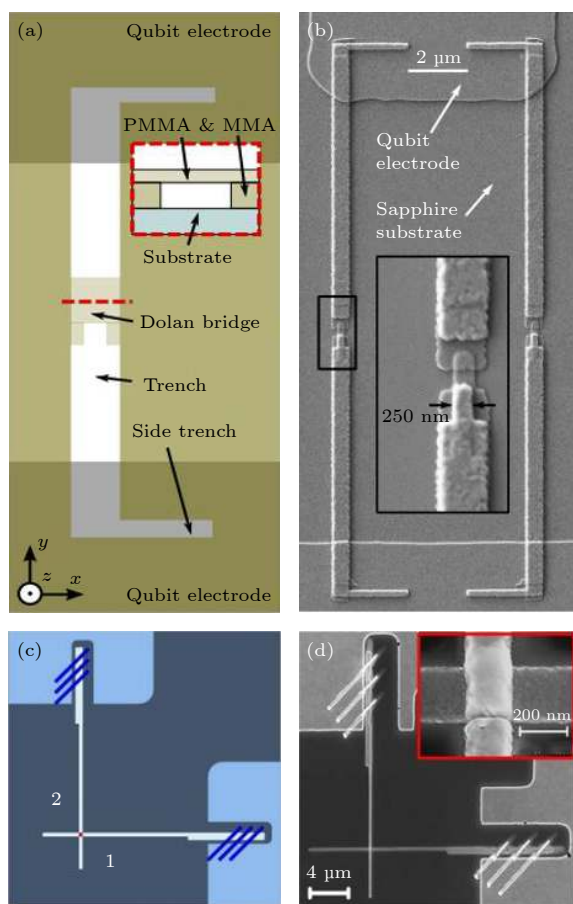


图 6 两种约瑟夫森结设计方案 (a), (c) 设计图; (b), (d) 对应设计图制备的约瑟夫森结电镜照片 [112,113]

Fig. 6. Two designs of Josephson junctions: (a), (c) Design drawings; (b), (d) electron micrographs of Josephson junctions prepared by corresponding designs [112,113].

3.5 超导量子多比特器件跨线的制备

随着同一芯片上量子比特数目的不断增加, 共地端设计的多量子比特之间不可避免会出现相互之间的串扰, 为解决各个量子比特之间的串扰问题需在芯片的不同区域之间用金属跨线将地端连接起来. 这类跨线的搭建工艺可以分为两种, 一种是多层膜工艺 [56], 一种是空气桥 (air bridge) 工艺 [102,114]. 多层膜工艺是指在基片上的第一层金属上再制备有指定图形的绝缘层和金属层, 以保证在不短路谐振腔的情况下将不同区域的地端连接起来. 空气桥工艺将多层膜工艺中的绝缘层替换为特定的光刻胶, 最后利用特殊工艺将光刻胶去掉, 搭建悬空的金属桥. 空气桥较之多层膜的一大优势就是避免了多层膜工艺中绝缘介质层可能给谐振腔带来的介电损耗从而可以提升谐振腔特性. 值得注意的是,

有报道指出谐振腔的品质因子会随着空气桥数量的变化而变化 [114,115], 这表明空气桥虽然解决了绝缘层的介电损耗问题但与空气桥结构、分布相关的介电损耗仍然存在, 这种结构性的损耗也会给器件带来负面的影响.

3.6 小结

本节较为详细地讨论了铌基器件的制备方法并就每一个步骤介绍提高器件性能的方法. 需要指出的是, 要提升超导量子比特的性能, 除了需要对金属薄膜与基底材料或绝缘层材料之间的损耗 [116,117] 和 TLS [44,116–124] 等因素有进一步的考虑外, 还需要大量详细的实验研究. 可以看到对提升铌基器件性能的研究引起了人们持续的关注, 例如近期有详细的研究表明 Nb_2O_5 是在最初 200 h 内唯一在铌膜上快速生长的氧化物 [81], 而该氧化物对器件性能的负面影响强于其他氧化物 [72,81]. 这些结果为进一步提升铌基器件的性能提供了有价值的参考.

4 铌基超导量子比特及辅助器件的制备与表征

4.1 铌基位相量子比特

位相量子比特是早期传统的一种设计方案, 由于其具有许多有益的特点在研究初期受到了广泛的关注 [125–129]. 利用金属铌为基底的多层膜工艺, 结合约瑟夫森结的双角度蒸发制备, 可以完善超导位相量子比特的制备工艺. 在这个制备工艺中, 需将从上到下的约瑟夫森结与铝膜、绝缘层薄膜 (α 硅或氟化钙)、铝膜、铌膜等 6 层不同材料的薄膜根据设计要求依次高精度 (精度高于 30 nm) 叠放制备在一起, 并利用双角度蒸发工艺将位相量子比特的约瑟夫森结面积减小至 $0.05 \mu\text{m}^2$, 该工艺既简化了位相量子比特的制备工艺又使得寄生在隧道势垒中的两能级系统 (TLS) 数量大大减少. 首次采用上述复杂的多层膜工艺成功制备了位相量子比特. 对器件能谱的测量结果表示, 在位相量子比特的通量偏置范围内没有 TLS 引发的劈裂交叉 [38], 且所制备的位相量子比特的能量弛豫时间相应的提升可达到 100 ns 量级, 实验制备的器件与测量结果如图 7 所示.

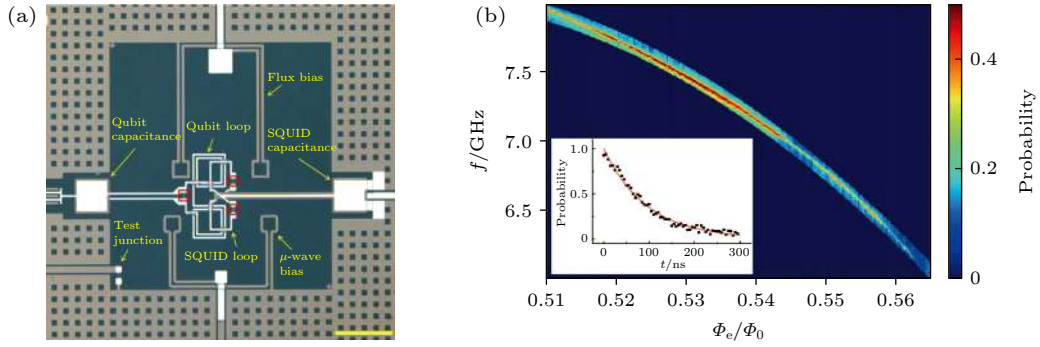


图 7 (a) 钌基位相量子位中心区域的光学显微镜照片, 硅基片呈绿色, 而较暗和较亮的金属部分是 Nb 和 Al 薄膜; (b) 位相量子比特能谱与能量弛豫时间的测量结果^[38]

Fig. 7. (a) Optical microscope image of the central region of Nb-based phase qubit, the substrate appears greenish in color while the darker and brighter parts are the Nb and Al films; (b) measurement results of energy spectrum and energy relaxation time of phase qubit^[38].

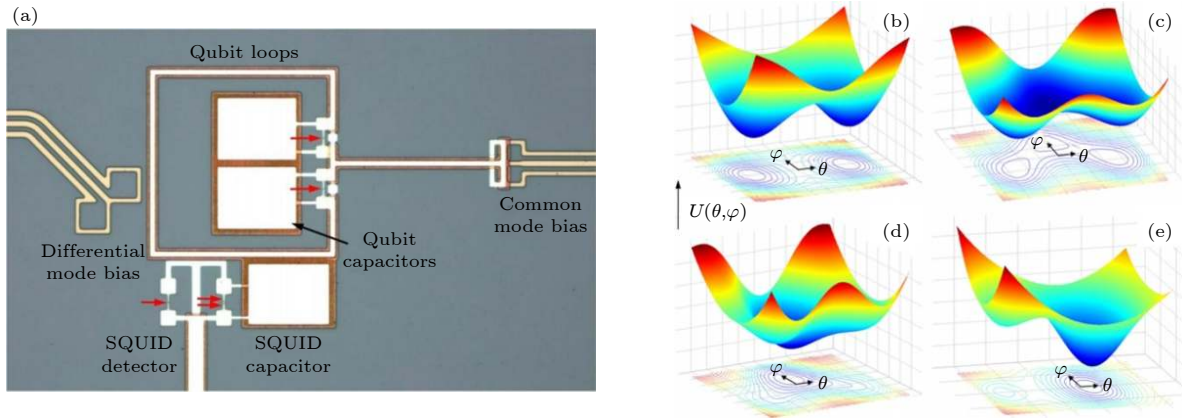


图 8 (a) 钌基 nSQUID 量子比特中心部分的假色光学照片, 衬底、Nb 层、Al 层和 α -Si 层分别呈灰色、浅黄色、白色和棕色; (b)–(e) nSQUID 量子比特不同条件下的典型二维势阱^[40]

Fig. 8. (a) False-colored optical photograph of the central part of Nb-based nSQUID qubit with the substrate, Nb layer, Al layers, and α -Si layer appearing in gray, light yellow, white, and brown, respectively; (b)–(e) Typical 2D potential landscapes of the nSQUID qubit^[40].

4.2 钌基 nSQUID 量子比特

随着超导量子计算实验中比特数目的增多, 量子信息在量子比特之间的传输速度显得日益重要. 为了实现量子信息在量子比特之间的快速传递, 根据磁通量子动力学原理, 提出了一种在超导量子电路中快速传输信息的方法^[130–133]. 以金属钌为基底材料设计、利用上述高精度的多达 6 层的多层膜工艺成功制备并表征了超导 nSQUID 量子比特^[40], 在国际上首次观察到 nSQUID 量子比特的量子相干性振荡, 证明了这种设计、工艺的可行性, 实验制备的器件与测试结果如图 8 所示. 除量子信息快速传输的特性外, nSQUID 量子比特在可调二维势、能级、波函数对称性和偶极矩阵元中都表现了丰富的物理内容, 为研究如二维势阱的隧穿等各

种宏观量子现象奠定了器件基础^[134–136].

4.3 钌基 Xmon 量子比特

以钌为超导电路基底材料结合铝约瑟夫森结制备的 CQED 框架 cavity 耦合传输子多量子比特器件, 采用超高真空磁控溅射获得高质量钌膜, 激光直写与干法刻蚀工艺结合实现稳定的图形转移, 双层光刻胶工艺结合低电压电子束曝光工艺获得了均匀性良好 (优于 90%) 的 Al-AlO_x-Al 约瑟夫森结, 特殊的除胶工艺使得钌表面制备近千条跨线成功率为 100%. 从工艺上考虑, Al-AlO_x-Al 约瑟夫森结的制备可以利用现有的商用仪器一站式的完成. 经测试器件的最长能量弛豫时间达到 40 μ s, 单比特门保真度可达 99.97%. 此外, 比特间串扰小

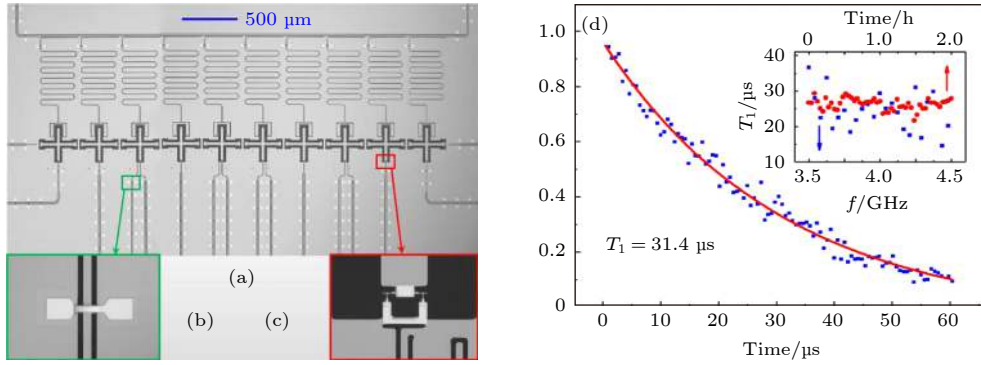


图 9 (a) 铌基耦合 10 比特器件中心区域; (b) 跨过控制线的空气桥; (c) 包含两个约瑟夫森结的 SQUID 环区域; (d) 样品能量弛豫时间测量结果^[39]

Fig. 9. Microscope images of (a) the central region of Nb-based coupled 10-qubit device; (b) an airbridge across the control line; (c) the SQUID loop area containing two Josephson junctions; (d) measurement results of sample energy relaxation time^[39].

于 1%, 10 个比特均可独立操控且有效耦合^[39] (实验制备的器件与测试结果参见图 9), 说明基于铌膜的制备工艺能够满足一定规模超导量子比特器件的测控实验. 美国普林斯顿大学的研究组在蓝宝石基片经过腐蚀等步骤进一步去除杂质上制备的铌基单量子比特的能量弛豫时间可以达到 56 μs , 而未用化学腐蚀清洗蓝宝石基片的样品性能稍低于上文中叙述的样品性能, 而在经过精细处理的硅基片上制备的铌基单量子比特的能量弛豫时间亦可以达到 40 μs 左右^[72].

更长的相干时间与更多的比特数目是超导量子计算进一步发展的关键, 相关的研究表明由材料缺陷引起的微波损耗是导致超导量子器件退相干和能量弛豫的主要原因^[124,129], 这种损耗同时限制了芯片上超导量子比特的数目^[34,137]. 在极低温 ($<100\text{ mK}$) 环境中的单光子水平微波功率下, 基片-金属、金属-空气和基片-空气界面的两能级系统 (TLS) 缺陷是上述微波损失的主要来源^[91], 进一步研究表明由于样品暴露于外界空气而生长在材料上的天然氧化物对微波损失起主要贡献^[36,67,138]. 对于铌基超导量子比特而言, 系统的研究指出器件中的微波损耗随铌膜表面上氧化物 (主要为 Nb_2O_5) 厚度增长而成比例增长, 当利用氢氟酸 (HF) 将铌膜表面的氧化物被去除后, 同一个器件的内部 Q 因子可明显的从 1×10^6 增大到 7×10^6 ^[81]. 由于氮化钛 (TiN) 制备的谐振腔拥有较高的 Q 值, 可将其用于铌金属表面氧化物的防治, 即在超高真空系统中生长铌膜后立即生长一层较薄的氮化钛 (TiN) 以保护铌的表面并提高样品的谐振腔 Q 值^[63,139]. 此外, 基片表面的杂质与生长铌薄膜之间的过渡层

也会形成微波损耗, 故要进一步提高样品性能以达到“state-of-the-art”的满意度, 还需要在生长金属之前对基片进行仔细的处理^[81]. 如上文所述, 基片处理的方法主要有两种, 一种是对生长铌膜前的硅基片进行化学腐蚀清洗并对生长铌膜后的硅基片再进行过刻蚀^[81], 另一种是在生长金属前对蓝宝石基片进行化学腐蚀清洗与高温退火^[42,82].

与金属铌同族的金属钽拥有成膜表面粗糙度低和材料动力电感低的特点^[83], 因而可降低材料中准粒子产生概率, 而且钽与其他金属相比有较低的湿蚀刻速率和更好的对氧化物的蚀刻选择性, 这些特点使钽基超导量子比特有望拥有更好的性能^[81]. 钽与铌的相似性使得在铌基器件上积累有益经验可以有效地用于制备钽基的超导量子比特, 不同研究单位经过上文所述的精细基片处理、精确控制钽膜生长条件、仔细清除钽膜表面的氧化物等工艺步骤所制备的钽基超导量子比特的能量弛豫时间已经达到亚毫秒量级且有进一步提升的可能^[42,82].

此外, 在进行超导量子芯片扩展的过程中, 在单个平面内形成二维列阵将导致布线困难, 复杂的布线设计也有可能产生较大的损耗, 采用多层工艺解决布线问题是一个较好的解决方法. 但在超导量子电路中, 该多层工艺中间的介质层又将引起显著的退相干. 解决上述问题的方法来源于半导体中的倒装焊工艺, 该工艺通过将器件分离到两个独立的芯片上, 然后通过芯片间的超导互连 (铜点倒装焊) 完成超导量子芯片的三维立体封装. 现行的三维立体封装工艺由 TiN on Al+Indium bump 组成, TiN 在其中作为 UBM (under bump metal) 层,

起钢、铝互溶反应阻隔层作用^[140]. 值得注意的是铌和 TiN 类似, 与钢没有互溶互扩散问题, 因此利用铌为基底的超导量子比特可以省去 TiN 阻隔层的制备.

4.4 铌基约瑟夫森参量放大器

以金属铌为基底多层膜工艺的另一个具体的应用是在超导多量子比特系统量子态单发测量所需的约瑟夫森参数放大器 (JPA)^[47,141–144]. 在该类器件的研究中, 采用了 S1813 光刻胶与 LOR2A 光刻胶双层胶工艺在铌膜基底上制备了可实现超导连接的阻抗变换器, 另外热蒸发制备的氟化钙绝缘层在极低温环境下工作状态良好. 测试结果表明, 利用该工艺所制备的 JPA 带宽高达 600 MHz, 有效增益超过 15 dB, 最大有效增益 24 dB, 噪声温度接近量子极限, 长期的使用反映出其各项性能的优良水平和良好的稳定性, 实验制备的器件与测试结果如图 10 所示. 将其用于超导量子比特单发测量的结果表明, 其使用后量子比特基态和第一激发态的信噪比约为 3, 读出保真度分别高于 97% 和 91%^[41], 可以供 10—20 个超导量子比特同时测量, 其同类器件中拥有较高的性能水平. 近年来, 多个课题组也报道了相关的进展, 以铝膜为基底制备的宽带 JPA 分别取得了带宽 200 MHz, 有效增益 14 dB 以上^[145]、带宽 300 MHz, 有效增益 17 dB^[146], 640 MHz 带宽和 20 dB 增益^[147]的良好性能. 包括约瑟夫森结在内的全铌材料宽带 JPA 达到带宽 190 MHz, 最大有效增益 20 dB^[148]. 在另外一项工作中, 研究者实现了一种更简便的制备方案, 在该方案中经过对传输线和非线性谐振器中电容器上板的重新设计提高了制备电容的质量, 且可以避免电容器的上板和地电极之间可能产生的对准偏差, 从而降低了该器件对制备工艺的要求. 该方案所制备的样品在精确的调节参数后可以达到带宽 400 MHz, 有效增益 17 dB, 噪声接近量子极限的水准^[149].

值得注意的是, 行波参量放大器 (TWPA)^[150] 与约瑟夫森行波参量放大器 (JTWPA)^[151] 是一种拥有更大带宽的约瑟夫森参数放大器设计. 基于约瑟夫森结传输线的超导放大器, 这种行波结构能够在 GHz 量级的带宽上获得高增益. 有报道指出, 利用铌基制备的约瑟夫森行波放大器在 3 GHz 的带宽范围内获得了 20 dB 的增益, 可以供 20 个量子

比特读出使用^[152]. 利用单一放大器放大 20 个量子比特是实现可扩展超导量子计算机这一长期目标路上的重要进展.

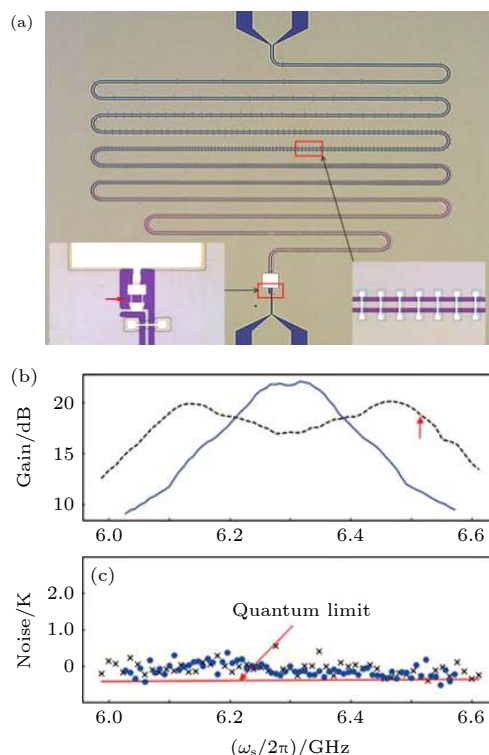


图 10 (a) 铌基 JPA 光学照片; (b) 增益与 (c) 噪声温度随频率的关系^[41]

Fig. 10. (a) False-colored optical photograph of Nb-based JPA device; (b) frequency dependences of the device gain and noise temperature (c)^[41].

5 总结与展望

过去的二十多年各国科学界对超导量子计算和量子信息进行了深入的研究, 尤其是量子优势的实现使人们真切地看到了针对某些特定的问题, 超导多量子比特处理器可以远超目前最强大算力的经典计算机^[68,153,154]. 此外, 针对各种物理问题的超导量子模拟研究也取得了丰富的成果^[6–16,155]. 为了今后超导量子计算进一步解决更广阔更复杂的物理、化学等学科的问题, 实现各类特定问题的量子模拟和量子计算, 以及最终实现普适的量子计算机, 超导量子比特在制备工艺上正朝着数目更多、量子相干时间更长的目标迈进. 围绕上述目标, 国际上对超导量子比特的制备工艺进行了持续和积极的探索, 研究表明, 不同金属材料的采用、基片的预处理、薄膜的生长环境、图形的制备过程等具体因素都会影响所制备的超导量子比特的性能.

本文首先回顾了不同的超导量子比特的设计方案与特征, 介绍了超导量子比特的基本工作原理, 继而着重讨论、归纳了以金属铌膜为首层材料的超导量子比特及其辅助器件的制备工艺. 虽然目前对于超导量子比特器件的设计与制备工艺已经有了非常广泛且深入的研究, 人们追求更长的量子相干时间以及更多超导量子比特数目的目标使对超导量子比特制备方法和工艺的进一步研究仍具有很强的迫切性. 详细讨论了铌基超导量子比特制备工艺的细 节和发展思路, 为相关的进一步研究提供了可参考的信息与方向. 目前我国超导量子计算正处于高速发展时期, 随着我国量子优势的实现^[156], 超导量子芯片的规模已突破 50—60 个量子比特, 正朝着 100 个量子比特的水平推进. 与此同时, 采用 3D 封装技术以降低信号串扰和向更多比特数方向发展, 进一步改善器件的量子相干时间, 以及提高量子信息处理和读出的保真度等方面的研究也正不断取得进展, 可以相信超导量子计算的研究在未来的几年内将会出现更大的发展与突破. 以铌膜和钽膜为基底的工艺可以满足高性能超导量子比特以及各类辅助器件的制备, 在后续研究中应拥有广阔的发展空间.

感谢北京量子信息科学院于海峰研究员的有益讨论.

参考文献

- [1] Makhlin Y, Schon G, Shnirman A 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 357
- [2] Clarke J, Wilhelm F K 2008 *Nature* **19** 459
- [3] Devoret M H, Schoelkopf R J 2013 *Science* **339** 1169
- [4] Krantz P, Kjaergaard M, Yan F, Orlando T P, Gustavsson S, Oliver W D 2019 *Appl. Phys. Lett.* **60** 21318
- [5] Kjaergaard M, Schwartz M E, Braumtiller J, Krantz P, Wang I J, Gustavsson S, Oliver W D 2020 *Annu. Rev.* **11** 369
- [6] Mi X, Ippoliti M, Quintana C, et al. 2021 arXiv: 2107.13571 v2 [quant-ph]
- [7] Makhlin Y, Schon G, Shnirman A 2007 *Physics* **73** 357
- [8] Paik H, Schuster D I, Bishop L S, Kirchmair G, Catelani G, Sears A P, Johnson B R, Reagor M J, Frunzio L, Glazman L I, Girvin S M, Devoret M H, Schoelkopf R J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 240501
- [9] Nakamura Y, Pashkin Y A, Tsai J S 1999 *Nature* **398** 786
- [10] Swingle B 2018 *Nat. Phys.* **14** 988
- [11] Salathé Y, Mondal M, Oppliger M, Heinsoo J, Kurpiers P, Potocnik A, Mezzacapo A, Heras U Las, Lamata L, Solano E, Filipp S, Wallraff A 2015 *Phys. Rev. X* **5** 021027
- [12] Barends R, Lamata L, Kelly J, et al. 2015 *Nat. Commun.* **6** 7654
- [13] Zhong Y P, Xu D, Wang P, Song C, Guo Q J, Liu W X, Xu K, Xia B X, Lu C Y, Han S, Pan J W, Wang H 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 110501
- [14] Flurin E, Ramasesh V V, Hacohe-Gourgy S, Martin L S, Yao N Y, Siddiqi I 2017 *Phys. Rev. X* **7** 031023
- [15] Roushan P, Neill C, Tangpanitanon J, et al. 2017 *Science* **358** 1175
- [16] Xu K, Chen J J, Zeng Y, Zhang Y R, Song C, Liu W X, Guo Q J, Zhang P F, Xu D, Deng H, Huang K Q, Wang H, Zhu X B, Zheng D N, Fan H 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 050507
- [17] Song C, Xu D, Zhang P, Wang J, Guo Q, Liu W, Xu K, Deng H, Huang K, Zheng D, Zheng S B, Wang H, Zhu X, Lu C Y, Pan J W 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 030502
- [18] Ma R, Saxberg B, Owens C, Leung N, Lu Y, Simon J, Schuster D I 2019 *Nature* **566** 51
- [19] Guo X Y, Yang C, Zeng Y, Peng Y, Li H K, Deng H, Jin Y R, Chen S, Zheng D N, Fan H 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 044080
- [20] Arute F, Arya K, Babbush R, Bacon D, Bardin J C, Barends R, Biswas R, Boixo S, Brandao F G, Buell D A 2019 *Nature* **574** 505
- [21] Xu K, Sun Z H, Liu W, Zhang Y R, Li H, Dong H, Ren W, Zhang P, Nori F, Zheng D, Fan H, Wang H 2020 *Sci. Adv.* **6** 4935
- [22] Guo Q, Cheng C, Sun Z H, Song Z, Li H, Wang Z, Ren W, Dong H, Zheng D, Zhang Y R, Mondaini R, Fan H, Wang H 2021 *Nat. Phys.* **17** 234
- [23] Kandala A, Temme K, Corcoles A D, Mezzacapo A, Chow J M, Gambetta J M 2019 *Nature* **567** 491
- [24] Kassal, Whitfield J D, Perdomo-Ortiz A, Yung M H, Aspuru-Guzik A, 2011 *Ann. Rev. Phys. Chem.* **62** 185
- [25] Lloyd S 1996 *Science* **273** 1073
- [26] O'Malley P J J, Babbush R, Kivlichan I D, et al. 2016 *Phys. Rev. X* **6** 031007
- [27] Peruzzo A, McClean J, Shadbolt P, Yung M H, Zhou X Q, Love P J, Aspuru-Guzik A, O'Brien J L 2014 *Nat. Comm.* **5** 4213
- [28] Emani P S, Warrell J, Anticevic A, et al. 2021 *Nat. Methods* **18** 701
- [29] Biamonte J, Wittek P, Pancotti N, Rebentrost P, Wiebe N, Lloyd S 2017 *Nature* **549** 195
- [30] Ristè D, Silva M P, Ryan C A, Cross A W, Corcoles A D, Smolin J A, Gambetta J M, Chow J M, Johnson B R 2017 *NPJ Quant. Inf.* **3** 16
- [31] Woerner S, Egger D J 2019 *NPJ Quant. Inf.* **5** 15
- [32] Chakrabarti S, Krishnakumar R, Mazzola G, Stamatopoulos N, Woerner S, Zeng W J arXiv:2012.03819 [quant-ph]
- [33] Chang J B, Vissers M R, Corcoles A D, Sandberg M, Gao J S, Abraham D W, Chow J M, Gambetta J M, Rothwell M B, Keefe G A, Steffen M, Pappas D P 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 012602
- [34] Zhang G Y, Liu Y B, James J, Andrew R, Houck A 2017 *npj Quant. Info.* **3** 1
- [35] Blok M S, Ramasesh V V, Schuster T, Brien K O, Kreikebaum J M, Dahlen D, Morvan A, Yoshida B, Yao N Y, Siddiqi I arXiv: 2003.03307 v1 [quant-ph]
- [36] Sage J M, Bolkhovskiy V, Oliver W D, Turek B, Welander P B 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 063915
- [37] Stammeier M, Garcia S, Wallraff A 2018 *Quantum Sci. Technol.* **3** 045007
- [38] Su F F, Liu W Y, Xu H K, Deng H, Li Z Y, Tian Y, Zhu X B, Zheng D N, Lu L, Zhao S P 2017 *Chin. Phys. B* **26** 060308

- [39] Su F F, Yang Z H, Zhao S K, Yan H S, Wang Z T, Song X H, Tian Y, Zhao S P 2021 *Chin. Phys. B* **30** 100304
- [40] Liu W Y, Su F F, Xu H K, Li Z Y, Tian Y, Zhu X B, Lu Li, Han S Y, Zhao S P 2018 *Supercond. Sci. Tech.* **31** 045003
- [41] Su F F, Wang Z T, Xu H K, Zhao S K, Yan H S, Yang Z H, Tian Y, Zhao S P 2019 *Chin. Phys. B* **28** 110303
- [42] Wang C L, Li X, Xu H K, et al. arXiv: 2105.09890 [quant-ph]
- [43] Chiorescu I, Nakamura Y, Harmans C J, Mooij J E 2003 *Science* **299** 1869
- [44] Simmonds R W, Lang K M, Hite D A, Nam S, Pappas D P, Martinis J M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 077003
- [45] Koch J, Terri M Y, Gambetta J, Houck A A, Schuster D I, Majer J, Blais A, Devoret M H, Girvin S M, Schoelkopf R J 2007 *Phys. Rev. A* **76** 042319
- [46] Majer J, Chow J M, Gambetta J M, Koch J, Johnson B R, Schreier J A, Frunzio L, Schuster D I, Houck A A, Wallraff A, Blais A, Devoret M H, Girvin S M, Schoelkopf R J 2007 *Nature* **449** 443
- [47] Barends R, Kelly J, Megrant A, Sank D, Jeffrey E, Chen Y, Yin Y, Chiaro B, Mutus J, Neill C, O'Malley P, Roushan P, Wenner J, White T C, Cleland A N, Martinis J M 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 080502
- [48] Manucharyan V E, Koch J, Glazman L I, Devoret M H 2009 *Science* **326** 113
- [49] Yan F, Gustavsson S, Kamal A, Birenbaum J, Sears A P, Hover D, Gudmundsen T J, Rosenberg D, Samach G, Weber S, Yoder J L, Orlando T P, Clarke J, Kerman A J, Oliver W D 2016 *Nat. Comm.* **7** 12964
- [50] Zhong Y P, Li C Y, Wang H H, Chen Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 110313
- [51] Johnson M W, Amin M H S, Gildert S, Lanting T, Hamze F, Dickson N, Harris R, Berkley A J, Johansson J, Bunyk P 2011 *Nature* **473** 194
- [52] Su F F, Yang Z H 2021 *Physics and Engineering* **31** 73
- [53] Houck A A, Schreier J A, Johnson B R, Chow J M, Koch J, Gambetta J M, Schuster D I, Frunzio L, Devoret M H, Girvin S M, Schoelkopf R J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 080502
- [54] Gambetta J M, Murray E, Fung Y K K 2017 *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **27** 1
- [55] Pop I M, Geerlings K, Catelani G, Schoelkopf R J, Glazman L I, Devoret M H 2014 *Nature* **508** 369
- [56] Martinis J M, Megrant A arXiv: 14105793 [quant-ph]
- [57] Megrant A, Neill C, Barends R, et al. 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 113510
- [58] Quintana C M, Megrant A, Chen Z, et al. 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 062601
- [59] Wang C, Axline C, Gao Y Y, Brecht T, Chu Y, Frunzio L, Devoret M H, Schoelkopf R J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 162601
- [60] Gambetta J M, Murray C E, Fung Y K K, McClure D T, Dial O, Shanks W, Sleight J, Senior, Steffen M 2017 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** 1
- [61] Leonard E, Beck M A, Nelson J, et al. 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 014009
- [62] Bruno A, de Lange G, Asaad S, van der Enden K L, Langford N K, DiCarlo L 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 182601
- [63] Vissers M R, Gao J, Wisbey D S, Hite D A, Tseui C C, Corcoles A D, Steffen M, Pappas D P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 232509
- [64] Gambetta J M, Murray C E, Fung Y K K, McClure D T, Dial O, Shanks W, Sleight J W, Steffen M 2017 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** 1700205
- [65] Wisbey D S, Gao J, Vissers M R, da Silva F C S, Kline J S, Vale L, Pappas D P 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 093918
- [66] Ohya S, Chiaro B, Megrant A, et al. 2014 *Supercond. Sci. Tech.* **27** 015009
- [67] Melville A, Calusine G, Woods W, Serniak K, Golden E, Niedzielski B M, Kim D K, Sevi A, Yoder J L, Dauler E A, Oliver W D 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 124004
- [68] Geerlings K, Shankar S, Edwards E, Frunzio L, Schoelkopf R J, Devoret M H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 192601
- [69] Dunsworth A, Megrant A, Quintana C, et al. 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 022601
- [70] Nersisyan A, Poletto S, Alidoust N, Manenti R, Renzas R, Bui C V, Vu K, Whyland T, Mohan Y, Sete E A, Stanwyck S, Bestwick A, Reagor M arXiv:1901.08042[quant-ph]
- [71] Altoé M V P, Banerjee A, Berk C, et al. arXiv:2012.07604[quant-ph]
- [72] Premkumar A, Weiland C, Hwang S, et al. arXiv: 2004.02908 v1[quant-ph]
- [73] Kamal A, Yoder J L, Yan F, Gudmundsen T J, Hover D, Sears A P, Welander P, Orlando T P, Gustavsson S, Oliver W D arXiv:1606.09262[cond-mat. mes-hall]
- [74] Earnest C T, Béjanin J H, McConkey T G, Peters E A, Korinek A, Yuan H, Mariani M 2018 *Supercond. Sci. Tech.* **31** 125013
- [75] You J Q and Nori F 2011 *Nature* **474** 589
- [76] Kjaergaard A, Schwartz M E, Braumüller J, Krantz P, Wang J I J, Gustavsson S, Oliver W D 2020 *Ann. Rev. Cond. Matter Phys.* **11** 369
- [77] Kreikebaum J M, Dove A, Livingston W, Kim E, Siddiqi I 2016 *Supercond. Sci. Tech.* **29** 104002
- [78] Segall K, Crankshaw D, Nakada D, Orlando T P, Levitov L S, Lloyd S, Markovic N, Valenzuela S O, Tinkham M, Berggren K K 2003 *Phys. Rev. B* **67** 220506
- [79] Gurvitch M, Washington M A, Huggins H A 1983 *Appl. Phys. Lett.* **42** 472
- [80] Cava R J, Batlogg B, Krajewski J J, Poulsen H F, Gammel P, Peck W F, Rupp L W 1991 *Phys. Rev. B* **44** 6973
- [81] Verjauw J, Potočník A, Mongillo M, et al. 2021 *Phys. Rev. Applied* **16** 014018
- [82] Place A P M, Rodgers L V H, Rodgers L V H, et al. 2021 *Nat. Comm.* **12** 1779
- [83] Gladczuk L, Patel A, Paur C S, Sosnowski M 2004 *Thin Solid Films* **467** 150
- [84] Face D W, Probe D E 1987 *J. Vac. Sci. Tech.* **5** 3406
- [85] Barends R, Baselmanns J J A, Hovenier J N, Gao J R, Yates S J C, Klapwijk T M, Hoevers H F C 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 263
- [86] Schauer A, Roschy M 1972 *Thin Solid Films* **12** 313
- [87] Fàbrega L, Fernández-Martínez I, Parra-Borderías M, Gil O, Camón A, Arrabal R G, Sesé J, Santiso J, Costa-Krämer J L, Briones F 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 3779
- [88] Shearrow A, Koolstra G, Whiteley S J, Earnest N, Barry P S, Heremans F J, Awschalom D D, Shirokoff E, Schuster D I arXiv:1808.06009 [cond-mat. mes-hall]
- [89] Profeta G, Franchini C, Lathiotakis N N, Floris A, Sanna A, Marques M A L, Lüders M, Massidda S, Gross E K U, Continenza A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 047003
- [90] Pickard C J, Errea I, Eremets M I 2020 *Ann. Rev. Condens. Matter. Phys.* **11** 57
- [91] Lisenfeld J, Bilmes A, Megrant A, Barends R, Kelly J, Klimov P, Weiss G, Martinis J M, Ustinov A V 2019 *NPJ Quantum Inf.* **5** 105

- [92] Park J, Yan A, Tilka J A, Sampson K C, Savage D E, Prance J R, Simmons C B, Lagally M G, Coppersmith S N, Eriksson M A, Holt M V, Evans P G 2016 *Appl. Phys. Lett.* **4** 066102
- [93] Lisenfeld J, Grabovskij G J, Müller C, Cole J H, Weiss G, Ustinov A V 2015 *Nat. Comm.* **6** 6182
- [94] Pateras A, Park Y, Ahn Y, Tilka J A, Holt M V, Reichl C, Wegscheider W, Baart T A, Dehollain J P, Mukhopadhyay U, Vandersypen L M K, Evans P G 2018 *Nano Lett.* **18** 2780
- [95] Anderson A C, Smith S C 1973 *J. Phys. Chem. Solids* **34** 111
- [96] Wang H, Shi C, Hu J, Han S, Yu C, Wu R Q 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 077002
- [97] Lee D, Du Bois J L, Lordi V 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 017001
- [98] Kumar P, Sendelbach S, Beck M A, Freeland J W, Wang Z, Wang H, Yu C C, Wu R Q, Pappas D P, McDermott R 2016 *Phys. Rev. Appl.* **6** 041001
- [99] Choi S, Lee D H, Louie S G, Clarke J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 197001
- [100] Neill C, Megrant A, Barends R, Chen Y, Chiaro B, Kelly J, Mutus J Y, O'Malley P J J, Sank D, Wenner J, White T C, Yin Y, Cleland A N, Martinis J M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 072601
- [101] Lock E H, Xu P, Kohler T, Camacho L, Prestigiacomo J, Rosen Y J, Osborn K D 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1700108
- [102] Woods W, Calusine G, Melville A, Sevi A, Golden E, Kim D K, Rosenberg D, Yoder J L, Oliver W D 2019 *Phys. Rev. Appl.* **12** 014012
- [103] Dolan G J 1977 *Appl. Phys. Lett.* **31** 337
- [104] Costache M V, Bridoux G, Neumann I, Valenzuela S O 2012 *J. Vac. Sci. Tech. B.* **30** 104
- [105] Kreikebaum J M, O'Brien K P, Morvan A, Siddiqi I 2020 *Supercond. Sci. Tech.* **33** 0602
- [106] Shapiro S 1963 *Phys. Rev. Lett.* **11** 80
- [107] Clarke J 1972 *Phys. Rev. Lett.* **28** 1363
- [108] Cai N, Zhou G, Müller K, Starr D E 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 171605
- [109] Ambegaokar V, Baratoff A 1963 *Phys. Rev. Lett.* **10** 486
- [110] Steinbach A, Joyez P, Cottet A, Esteve D, Devoret M H, Huber M E, Martinis J M 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 137003
- [111] Zhang E, Srinivasan S, Sundaresan N, et al. arXiv: 2012.08475 [quant-ph]
- [112] Bilmes A, Neumann A K, Volosheniuk S, Ustinov A V, Lisenfeld J arXiv: 2101.01453 v2 [quant-ph]
- [113] Osman A, Simon J, Bengtsson A, Kosen S, Krantz P, Perez D, Scigliuzzo M, Bylander J, Roudsari A F arXiv: 2011.05230 v1 [cond-mat. sup-con]
- [114] Chen Z, Megrant A, Kelly J, et al. 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 052602
- [115] Rosenberg D, Weber S J, Conway D, Jost D R W, Mallek J, Calusine G, Das R, Kim D, Schwartz M E, Woods W, Yoder J L, Oliver W D 2020 *IEEE Micro. Mag.* **21** 72
- [116] Jin Z C, Wu H T, Yu H F, Yu Y 2018 *Chin. Phys. B* **27** 100310
- [117] Burnett J J, Bylander J, Bengtsson A, Scigliuzzo M, Niepce D 2019 *NPJ Quantum Inf.* **5** 1
- [118] Schlor S, Lisenfeld J, Mueller C, Bilmes A, Schneider A, Pappas D P, Ustinov A V, Weides M 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 190502
- [119] Nersisyan A, Poletto S, Alidoust N, Manenti R, Renzas R, Bui C V, Vu K, Whyland T, Mohan Y, Sete E A, Stanwyck S, Bestwick A, Reagor M arXiv:1901.08042 [quant-ph]
- [120] Oliver W D, Welander P B 2013 *MRS Bulletin* **38** 816
- [121] de Graaf S E, Faoro L, Burnett J, Adamyan A A, Tzalenchuk A Y, Kubatkin S E, Lindström T, Danilov A V 2018 *Nat. Commun.* **9** 1143
- [122] Lisenfeld J, Mueller C, Cole J H, Bushev P, Lukashenko A, Shnirman A, Ustinov A V 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 230504
- [123] Paz A, Lebedeva I, Tokatly I, Rubio A 2014 *Phys. Rev. B* **90** 224202
- [124] Muller C, Cole J H, Lisenfeld J 2019 *Rep. Prog. Phys.* **82** 124501
- [125] Martinis J M, Cooper K B, McDermott R, Steffen M, Ansmann M, Osborn K D, Cicak K, Oh S, Pappas D P, Simmonds RW and Yu C C 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 210503
- [126] Neeley M, Ansmann M, Bialczak R C, Hofheinz M, Katz N, Lucero E, O'Connell A, Wang H, Cleland A N and Martinis J 2008 *Phys. Rev. B* **77** 180508
- [127] Martinis J M 2009 *Quantum Inf. Process.* **8** 81
- [128] Weides M, Bialczak R C, Lenander M, Lucero E, Mariani M, Neeley M, O'Connell A D, Sank D, Wang H, Wenner J, Yamamoto T, Yin Y, Cleland A N and Martinis J 2011 *Supercond. Sci. Technol.* **24** 055005
- [129] Lecocq F, Pop I M, Peng Z H, Matei I, Crozes T, Fournier T, Naud C, Guichard W and Buisson O 2011 *Nanotechnology* **22** 315302
- [130] Semenov V K, Danilov G V, Averin D V 2003 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** 938
- [131] Semenov V K, Danilov G V, Averin D V 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 455
- [132] Ren J, Semenov V K, Polyakov Y A, Averin D V, Tsai J S 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 961
- [133] Averin D V, Xu K, Zhong Y P, Song C, Wang H, Han S 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 010501
- [134] Han S, Lapointe J, Lukens J E 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 1712
- [135] Li S X, Yu Y, Zhang Y, Qiu W, Han S 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 098301
- [136] Balestro F, Claudon J, Pekola J P, Buisson O 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 158301
- [137] Lei C U, Krayzman L, Ganjam S, Frunzio L, Schoelkopf R J 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 154002
- [138] Barends R, Vercruyssen N, Endo A, de Visser P J, Zijlstra T, Klapwijk T M, Diener P, Yates S J C, Baselms J J A 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 023508
- [139] Leduc H G, Bumble B, Day P K, Eom B H, Gao J, Golwala S, Mazin B A, McHugh S, Merrill A, Moore D C, Noroozian O, Turner A D, Zmuidzinas J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 102509
- [140] Foxen B, Mutus J Y, Lucero E, et al. 2018 *Quantum Sci. Technol.* **3** 014005
- [141] Levenson-Falk E M, Vijay R, Siddiqi I 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 123115
- [142] Castellanos-Beltran M A, Irwin K D, Hilton G C, Vale L R, Lehnert K W 2008 *Nat. Phys.* **4** 929
- [143] Siddiqi I, Vijay R, Pierre F, Wilson C M, Metcalfe M, Rigetti C, Frunzio L, Devoret M H 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 207002
- [144] Reed M D, DiCarlo L, Johnson B R, Sun L, Schuster D I, Frunzio L, Schoelkopf R J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 173601
- [145] Huang K Q, Guo Q J, Song C, Zheng Y R, Deng H, Wu Y L, Jin Y R, Zhu X B, Zheng D N 2017 *Chin. Phys. B* **26** 094203
- [146] Yang R, Deng H 2020 *IEEE Trans. APP. Supercon.* **30** 4
- [147] Roy T, Kundu S, Chand M, Vadiraj A M, Ranadive A,

- Nehra N, Patankar M P, Aumentado J, Clerk A A, Vijaz R 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 262601
- [148] Xue H, Lin Z R, Jiang W B, Niu Z Q, Liu K, Peng W, Wang Z 2021 *Chin. Phys. B* **30** 068503
- [149] Lu Y P, Zuo Q, Pan J Z, Jiang J L, Wei X Y, Li Z S, Xu W Q, Zhang K X, Guo T T, Wang S, Cao C H, Xu W W, Sun G Z, Wu P H 2021 *Chin. Phys. B* **30** 068504
- [150] Eom B H, Day P K, LeDay H G, Zmuidzinas J 2012 *Nat. Phys.* **8** 623
- [151] White T C, Mutus J Y, Kelly J, Sank D, Martinis J M 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 242601
- [152] Macklin C, O'Brien, Hover D, Schwartz M E, Bolkhovskiy V, Zhang X, Oliver W D, Siddiqi I 2015 *Science* **350** 307
- [153] Harrow A W, Montanaro A 2017 *Nature* **549** 203
- [154] Kelly J, Barends R, Fowler A G, et al. 2015 *Nature* **519** 66
- [155] Xu H K, Song C, Liu W Y, Xue G M, Su F F, Deng H, Tian Y, Zheng D N, Han S Y, Zhong Y P, Wang H, Liu Y X, Zhao S P 2016 *Nat. Comm.* **7** 11018
- [156] Wu Y L, Bao W S, Cao S R, Chen F S, Chen M C, Pan J W, et al. arXiv: 2106.14734 v1 [quant-ph]

REVIEW

Fabrication of superconducting qubits and auxiliary devices with niobium base layer*

Su Fei-Fan¹⁾ Yang Zhao-Hua¹⁾²⁾ Zhao Shou-Kuan¹⁾²⁾ Yan Hai-Sheng¹⁾²⁾
Tian Ye¹⁾ Zhao Shi-Ping^{1)2)†}

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 8 October 2021; revised manuscript received 5 November 2021)

Abstract

Over the past two decades significant advances have been made in the research of superconducting quantum computing and quantum simulation, in particular of the device design and fabrication that leads to ever-increasing superconducting qubit coherence times and scales. With Google's announcement of the realization of "quantum supremacy", superconducting quantum computing has attracted even more attention. Superconducting qubits are macroscopic objects with quantum properties such as quantized energy levels and quantum-state superposition and entanglement. Their quantum states can be precisely manipulated by tuning the magnetic flux, charge, and phase difference of the Josephson junctions with nonlinear inductance through electromagnetic pulse signals, thereby implementing the quantum information processing. They have advantages in many aspects and are expected to become the central part of universal quantum computing. Superconducting qubits and auxiliary devices prepared with niobium or other hard metals like tantalum as bottom layers of large-area components have unique properties and potentials for further development. In this paper the research work in this area is briefly reviewed, starting from the design and working principle of a variety of superconducting qubits, to the detailed procedures of substrate selection and pretreatment, film growth, pattern transfer, etching, and Josephson junction fabrication, and finally the practical superconducting qubit and their auxiliary device fabrications with niobium base layers are also presented. We aim to provide a clear overview for the fabrication process of these superconducting devices as well as an outlook for further device improvement and optimization in order to help establish a perspective for future progress.

Keywords: superconducting qubit, device fabrication, quantum computing

PACS: 03.67Lx, 85.25Cp

DOI: 10.7498/aps.71.20211865

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11874063) and the Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2018B030326001).

† Corresponding author. E-mail: spzhao@iphy.ac.cn