

用于电压基准的约瑟夫森结阵列量子电压芯片

曹文会, 李劲劲, 钟源, 钟青, 王雪深, 徐骁龙, 徐达

(中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 量子电压基标准是计量领域最基础、最重要的基标准, 是电学量和大部分非电量基标准的溯源源头。本团队开发了用于量子电压基准的大规模集成约瑟夫森结阵芯片, 打破了国外垄断。芯片规模最大可以实现包含 40 万量级的物理串联结的结阵; 微伏电压芯片可实现最小 1 μ V 的量子电压输出; 2V 结阵芯片可以实现最高 2V 的量子电压输出。现在所研制芯片已经应用在中国计量科学研究院和北京无线电计量测试研究所的电压计量测试工作中。

关键词: 电压基准;约瑟夫森结;超导量子器件;微纳加工工艺

Josephson Junction Arrays for Voltage Standard Applications

Cao Wenhui, Li Jinjin, Zhongyuan, Zhong Qing,

Wang Xueshen, Xu Xiaolong, Xu Da

(National Institute of Metrology, Beijing, 100029)

Abstract: Quantum voltage standard is the most basic and important standard in the field of metrology, and it is the traceability source of electrical quantity and most non-electric standards. Our team developed large-scale integrated Josephson array chips for quantum voltage standard, which broke the foreign monopoly. The maximum size of the chip can be realized including 400 thousand physical linked arrays; Microvoltage chip can realize the minimum quantum voltage output of 1 μ V; The 2 V array chip can achieve a quantum voltage output of up to 2 V. Now the developed chips have been applied in the voltage measurement work of China National Institute of Metrology and Beijing Radio Metrology Test Institute.

Keywords: Voltage Standard, Josephson Junctions, Superconducting electronics, Micro and nano processing technology.

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

量子电压基标准是计量领域最基础、最重要的基标准, 是电学量和大部分非电量基标准的溯源源头。大规模集成约瑟夫森结阵芯片是量子电压基标准及相关精密测量系统所需核心芯片。该类芯片研制难度极大, 长期以来只有美、日、德三个国家成功研制^[1-5]。量子电压芯片是限制我国已久的“卡脖子”芯片。核心技术的缺失严重制约了我国电学量子计量领域的量值安全及领域发展;

1.2 应用价值

研发芯片替代国外产品，有力支持我国计量事业；初步效果：已支持国家重点研发计划项目的研究，并在中国计量科学研究院和北京无线电计量测试研究所等计量单位获得应用。

2 创新点与优势

2.1 器件制作

通过采用多元材料应变控制等方法，彻底攻克了约瑟夫森结大规模集成工艺技术瓶颈，将Nb/ Nb_xSi_{1-x} /Nb 约瑟夫森结物理集成度提升至 40 万量级，达到国际最好水平，使我国成为继美、日、德后第四个具备此能力的国家。

2.2 器件微波设计

创建基于超导材料的片上基础元件库模型，自主设计并实现了超导功分器、滤波器等功能性微波电路单元；建立修正约瑟夫森结电阻损耗的渐变波导算法模型，优化波导上微波驱动信号分布，解决链路微波传输问题。最终解决了量子电压类芯片所需基于超导材料的芯片上微波电路关键技术，在低温下实现功能微波电路。

2.3 器件实现

在我国首次自主设计并实现了新型 2 V PJVS 芯片。芯片通过了中国计量院所拥有的美国国家标准与技术研究院（NIST, National Institute of Standard and Technology）研制的可编程量子电压系统验证，表明自主芯片满足 PJVS 应用需求。本课题同步研发了用于PJVS 的自主算法。采用自主芯片及自主算法合成了峰值 2.3 V、频率 50 Hz 的交流量子电压信号。芯片可实现从 2.5 mV- 2.3 V 之间任意直流电压输出。设计并实现双通道约瑟夫森微伏量子电压芯片，使我国在国际上率先实现基于一个芯片的高精度微伏量子电压标准，已用于检测校准。

3 实现方案简介3.1 制作工艺

我们采用了选择性 Nb 刻蚀的方法（SNEP）制作 Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb 材料的 SNS 型约瑟夫森结。此工艺包括薄膜沉积、光刻、干法刻蚀、绝缘层沉积及刻蚀、电阻层沉积及剥离等十多个微纳加工工艺步骤。通过对多元材料生长、刻蚀、光刻以及应变控制的详细研究，完全掌握了用于电压基准器件的微纳加工工艺，成功制作出了多种用于电压基准的约瑟夫森结阵列器件。

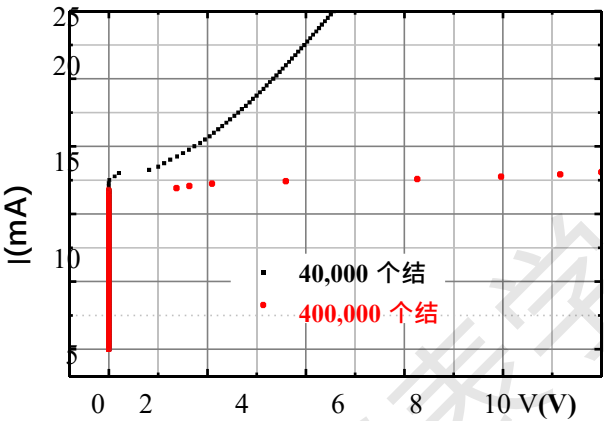
3.2 设计方法

量子电压芯片中约瑟夫森结数量大，需要分为多链路结阵。每一路均需微波信号驱动。微波信号需由室温引至 4.2 K 工作温区，理想方案是在量子电压芯片上设计微波功率分配电路。其次，微波驱动信号在链路传输中存在结本征损耗，限制了电压量子平台宽度，需设计新型传输波导实现链路上每个结驱动一致。

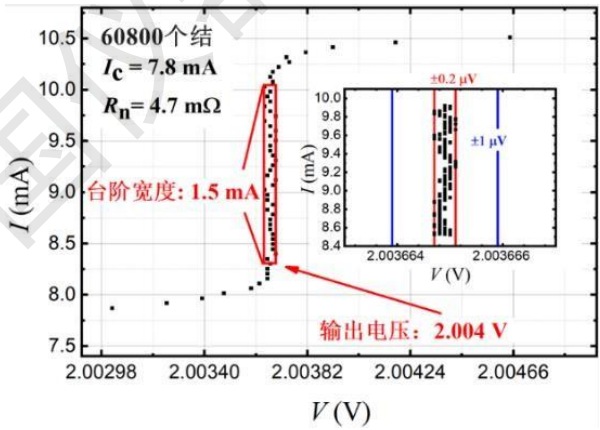
我们首先设计了用于量子电压芯片的功分器，滤波器，然后我们对设计的微波电路进行仿真，通过仿真结果选择最优的电路参数分布，并最终设计制作出了包含数万约瑟夫森结器件的结阵芯片。

3.3 器件测试分析

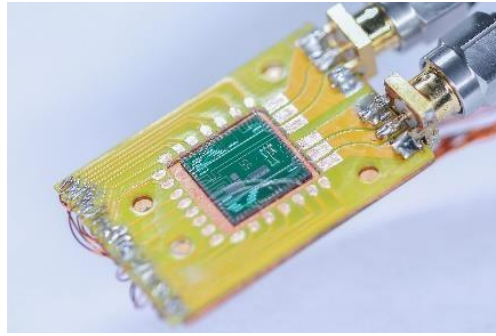
(1) 通过对 40 万 Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb 约瑟夫森结测试，可以观测到标准的超导直流 I-V 特性曲线；



(2) 自主设计并实现 2 V 可编程交流约瑟夫森量子电压器件。采用自主算法器件可合成峰值 2.3 V 交流量子电压，可实现从 2.5 mV-2.3 V 之间任意直流电压输出。器件并已通过美国国家标准技术院生产的商用可编程量子电压系统验证；



(3) 自主设计并实现频率差分法微伏量子电压器件。通过差分法可实现最小 1 V 的量子电压输出。下图为封装后的频率差分法微伏量子电压芯片。芯片由两个通道组成，当频率差为 483.5979 MHz 时，可实现 1 V、2 V、4 V 等电压输出。该芯片通过差分法可实现最小 1 V 的量子电压输出，离散性为 $1.34 \times 10^{-9} \text{ V}$ ^[6]。



参考文献:

- [1] Rufenacht A , Flowers-Jacobs N E , Fox A R E , et al. JOSEPHSON VOLTAGE STANDARD:, US20200373475A1[P]
- [2]Kohlmann.J,Behe,R,&Funck T.Josephson voltage standards science and Technology,14(8),1216.71.10
- [3] Yamamori H , Yamada T , Sasaki H , et al. Improved Fabrication Yield for 10-V Programmable Josephson Voltage Standard Circuit Including 524288 NbN/TiN/NbN Josephson Junctions[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity: A Publication of the IEEE Superconductivity Committee, 2010(2):20
- [4] 李春光, 王佳, 吴云,等. 中国超导电子学研究及应用进展[J]. 物理学报, 2021, 70(1):26.
- [5] 郭小玮, 迟宗涛, 曹文会,等. 约瑟夫森结阵器件的研究进展[J]. 计量学报, 2013, 34(4):5.
- [6]Li,Honghui,Yuan Gao and Zengmin Wang.“Microvolt Josephson voltage set-up based on programmable Josephson arrays.”