

用于精密测量玻尔兹曼常数的量子电压噪声源芯片研制

王兰若 钟源 李劲劲 屈继峰 钟青 曹文会 王雪深 周志强 付凯 石勇

Development of quantum voltage noise source chip for precision measurement of Boltzmann constant
Wang Lan-Ruo Zhong Yuan Li Jin-Jin Qu Ji-Feng Zhong Qing Cao Wen-Hui Wang Xue-Shen
Zhou Zhi-Qiang Fu Kai Shi Yong

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 108501 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172643

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172643>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[空心圆柱形永磁体内径对单畴 GdBCO 超导块材磁悬浮力的影响](#)

Effect of inner diameter of hollow cylindrical permanent magnet on levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor

物理学报.2018, 67(7): 077401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172418>

[钾钡共掺菲分子结构和电子特性的第一性原理研究](#)

First principles studies on molecular structure and electronic properties of K- and Ba-codoped phenanthrene

物理学报.2017, 66(23): 237401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.237401>

[基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究](#)

Model of bit error rate for laser communication based on superconducting nanowire single photon detector

物理学报.2017, 66(19): 198501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.198501>

[硼膜制备工艺、微观结构及其在硼化镁超导约瑟夫森结中的应用](#)

Preparation, microstructure of B film and its applications in MgB₂ superconducting Josephson junction

物理学报.2016, 65(1): 017401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.017401>

[具有 Washer 型输入线圈的超导量子干涉放大器的制备与表征](#)

Fabrication and characterization of the superconducting quantum interference device amplifier with Washer type input coil

物理学报.2015, 64(12): 128501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.128501>

用于精密测量玻尔兹曼常数的量子电压噪声源芯片研制*

王兰若¹⁾ 钟源²⁾³⁾† 李劲劲²⁾³⁾‡ 屈继峰²⁾ 钟青²⁾³⁾ 曹文会²⁾³⁾
王雪深²⁾³⁾ 周志强²⁾ 付凯²⁾ 石勇²⁾

1)(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100089)

2)(中国计量科学研究院, 北京 100029)

3)(国家质检总局电学量子基准重点实验室, 北京 100029)

(2017年12月13日收到; 2018年2月19日收到修改稿)

量子噪声温度计系统可通过比较导体中电子运动的热噪声和量子电压参考噪声精密测量玻尔兹曼常数, 其中量子电压噪声源所合成的量子电压参考噪声由一组超导约瑟夫森结阵产生. 本文详细介绍了基于Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb约瑟夫森结的量子电压噪声源芯片的设计、制备及测试; 采用脉冲驱动模式, 合成了具有量子精度的100 kHz交流量子电压信号. 结果表明: 本文所研制的噪声温度计核心芯片已具备了合成交流电压的功能, 可为后续玻尔兹曼常数精密定值、重新定义及复现热力学温度研究提供核心器件.

关键词: 玻尔兹曼常数, 量子电压, 噪声温度计, 约瑟夫森结

PACS: 85.25.Cp, 74.40.De, 74.25.Sv, 06.20.Jr

DOI: 10.7498/aps.67.20172643

1 引言

温度单位开尔文(K)是国际单位制(SI)的七个基本单位之一. 目前开尔文定义为水三相点温度的1/273.16^[1]. 2018年, 国际计量局将讨论重新定义开尔文. 新的定义将不再依赖于实物, 而仅与玻尔兹曼常数 k_B 相关^[2,3]. 量子电压标定的噪声测温法^[4-6]通过比较导体中电子运动的热噪声和具有量子准确度的参考电压噪声, 可实现纯电学的玻尔兹曼常数精密测定, 其实验系统的核心是能够合成量子准确度参考电压信号的量子电压噪声源(quantum voltage noise source, QVNS)芯片.

近年来, 世界多国均开展了用于噪声温度计的量子电压噪声源芯片相关研究. 美国国家标准技术研究院(NIST)最早提出

并实现了量子电压标定的噪声温度计系统, 其芯片核心是基于Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb势垒层的超导/金属/超导型(superconductor/normal metal/superconductor, SNS)约瑟夫森结阵^[7-10]. 2013年, 日本产业技术综合研究所(AIST)采用TiN作为约瑟夫森结的势垒层, 制作出基于Nb/TiN/Nb型约瑟夫森结阵的量子电压噪声源芯片^[11-13]. 中国计量科学研究院(NIM)于2010年陆续开展了用于各类量子电压基准的约瑟夫森结阵器件的研究工作, 主要是基于Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb的SNS新型约瑟夫森结技术^[14]. 量子电压噪声源作为约瑟夫森结阵芯片的重要应用, 其研制工作亦随即展开.

本文详细介绍了基于Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb约瑟夫森结阵及超导微波线路的量子电压噪声源芯片

* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFF0200402)、国家自然科学基金(批准号: 61771441)和国家自然科学基金青年基金(批准号: 61701470)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhongyuan@nim.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: jinjinli@nim.ac.cn

的设计、制备与测试. 在 4.2 K 温度下, 采用脉冲驱动模式合成了具有量子精度的 100 kHz 交流量子电压信号.

2 器件设计与制作

2.1 芯片设计

用于噪声温度计的量子电压噪声源芯片工作时需要模拟产生 100 Ω 标准电阻在水的三相点 (273.16 K) 下极微弱 ($\sim 1.2 \text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$) 的噪声电压, 即赝噪声. 这种赝噪声必须是精确的、极低干扰的、可使用交叉相关技术测量的. 其精确性的获得是利用数学工具将期望合成的波形调制成一列数字码型, 用高速脉冲驱动约瑟夫森结阵, 非回滞约瑟夫森结阵是天然的量子滤波器, 能够滤除脉冲码形发生器产生的幅度噪声和相位噪声, 得到纯净的期望合成的波形. 量子电压噪声源芯片需要使用 A, B 两个信道测量, 再通过两个信道之间进行交叉相关排除测量线路中随机噪声的干扰^[9]. 图 1 (a) 为用

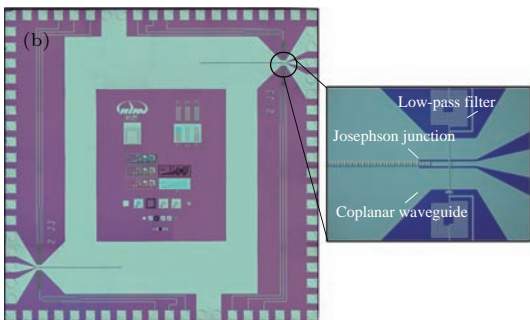
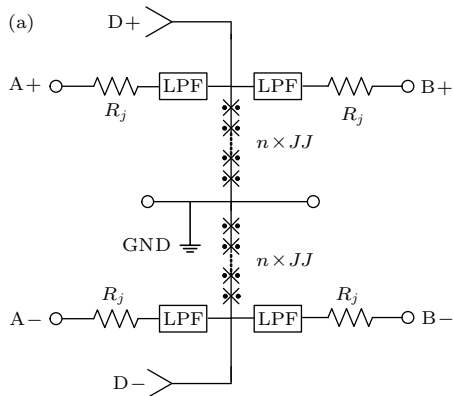


图 1 量子电压噪声源芯片示意图 (a) 量子电压噪声源芯片电路示意图; (b) 光学显微镜下量子电压噪声源芯片实物图 (1 cm \times 1 cm)

Fig. 1. Quantum voltage noise source chip: (a) Circuit of quantum voltage noise source; (b) microscope photo of QVNS chip (1 cm \times 1 cm).

于量子电压噪声源的约瑟夫森结阵电路示意图, 其核心为两组数目相同的 Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb 约瑟夫森结阵串联组成的阵列, 如图中 $n \times JJ$ 所示, n 表示每个子阵列结的个数. 图中 D+ 和 D- 为数字脉冲输入端口, 由相反极性的脉冲信号来驱动约瑟夫森结; A+, A-, B+, B- 为两路信道端口; GND 为接地点, 用来抑制两个对称电路产生共模信号; 为避免脉冲驱动信号泄漏到信号输出端对采集的合成信号产生干扰, 在信号输出端采用了低通滤波器^[15] (low pass filter, LPF) 对脉冲信号进行隔离; R_j 为使得量子噪声源与电阻热噪声源电路相对应的匹配电阻.

图 1 (b) 为光学显微镜下量子电压噪声源芯片实物图. 芯片采用渐变共面波导 (coplanar waveguide, CPW) 作为微波功率的入射端口, 渐变至传输线结部分, 形成 16 μm 宽的中心信号线及 71 μm 宽的地线, 地线与中心线间隔为 6 μm . 微波传输线保持 50 Ω 的特征阻抗, 约瑟夫森结嵌在 CPW 中心信号线中. 芯片核心部分为两路约瑟夫森结阵, 每路阵列包括 4 个约瑟夫森结, 结尺寸为 6 $\mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$. 渐变共面波导和微波传输线的设计工作频率为 5 GHz, 芯片中所有微波单元均通过仿真软件 ADS 和 HFSS 进行了仿真实验.

2.2 器件制备

本芯片中约瑟夫森结阵的目标工作频率为 5 GHz, 采用非回滞 Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb 结, 其主要优点是可以控制势垒层中 Nb 靶和 Si 靶的溅射功率以及溅射时间, 来调节势垒层中 Nb_xSi_{1-x} 的组分和厚度, 从而控制结的电学特性^[16,17]. 为摸索 5 GHz 工作频率下结的工艺参数及检验制备工艺流程的有效性, 本文同时在掩模版中设计了含有不同尺寸结的结阵测试芯片, 每个结阵包含 200 个结. 这样的设计便于获得不同尺寸的结对应的临界电流 I_c 、临界电流密度 J_c 、结电阻 R_n 参数.

芯片采用超高真空磁控溅射方法制备 Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb 三层薄膜结构. 衬底选用 2 inch 表面氧化的硅衬底. 由于磁控溅射工艺步骤对调控约瑟夫森结电学特性至关重要, 因而在溅射过程中需严格控制腔室残余气体组分、本底真空度、溅射气压、溅射功率等条件. 本文所使用的三层薄膜溅射工艺中, 本底真空度约为 2.5×10^{-8} Torr, 上下层 Nb 膜的溅射功率为 500 W, 溅射气压为

4.8 mTorr, 在溅射过程中衬底通过背部循环水冷却保持在 20 °C. 根据经验, 在这种条件下溅射的 Nb 膜的超导转变温度 T_c 约为 9.09 K, 转变宽度 ΔT 为 0.03 K, 电阻率为 16.1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$, 剩余电阻比 (RRR) 为 4.83 [18]. 势垒层采用 Nb 与 Si 共溅射的方法, Nb 靶溅射功率为 50 W, Si 靶溅射功率为 250 W. 薄膜应力随溅射气压的改变而变化 [19], 在本文使用的磁控溅射系统中, 当溅射气压为 4.7—5 mTorr 时薄膜易呈现压应力, 本芯片制作时使用 4.8 MPa 的溅射气压, 三层薄膜应力为 110 MPa 的压应力. 采用光刻及反应离子刻蚀技术 (reactive ion etching, RIE) 与感应耦合等离子体刻蚀 (inductively coupled plasma, ICP) 技术定义约瑟夫森结区和底电极. 随后采用等离子体增强的气相沉积法 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 沉积 SiO_2 绝缘层, 并定义及刻蚀通孔. 再次磁控溅射 Nb 膜, 经光刻后对其进行 RIE 刻蚀形成引线层. 此后采用反转胶光刻电阻层图案, 电子束蒸发带胶沉积 PdAu 电阻薄膜, 剥离光刻胶后形成电阻层. 经过以上工艺制作完成的芯片外观如图 1 (b) 所示.

3 器件测试

3.1 测试芯片 (test chip)

为了便于获取每一批次制作的结参数, 含有不同尺寸约瑟夫森结阵的 test chip 与量子电压噪声源芯片 (QVNS chip) 被设计在同一套光刻版中进行同时制作. 图 2 为 test chip 中不同尺寸的 200 个约瑟夫森结串联阵列在 4.2 K 下的直流 I - V 特性曲线, 可以看出, 从这些结阵中均可观察到清晰的隧穿电流, 表明各阵列直流特性良好. 表 1 为各尺寸结阵对应的临界电流 I_c 、临界电流密度 J_c 、结电阻 R_n 值. 其中 J_c 和 $I_c R_n$ 值随结面积增加而趋近某值说明表 1 中测量结果可信, 无异常原因导致其值的无规律变化, 也间接地说明工艺过程稳定可靠. QVNS chip 中的约瑟夫森结阵嵌在 CPW 中心信号线中, 虽然每路阵列只包括 4 个约瑟夫森结, 还是采用了与大规模约瑟夫森结阵相同的长方形结构, 尺寸为 $6\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$. 由于量子电压噪声源芯片要求结阵的交流电压平台具有一定宽度 (约 1 mA), 相应的结阵的临界电流 I_c 为 5—8 mA. 每轮调整 $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ 的组分和厚度后通过测试 test chip 中 $8\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$ 和 $9\ \mu\text{m} \times 9\ \mu\text{m}$ 结阵的 I_c 和

R_n 值能够预估出 QVNS chip 中 $6\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ 结阵的相应值, 从而判定 $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ 的组分和厚度是否调整到位, 如果进入目标值区域 ($I_c \sim 5\text{—}8\ \text{mA}$) 则可进一步进行 QVNS chip 的测试.

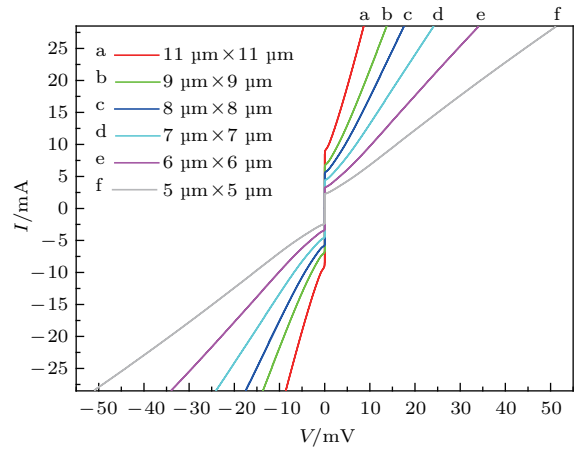


图 2 测试芯片中不同尺寸结阵的直流 I - V 特性曲线
Fig. 2. DC I - V curves of junction arrays in different sizes in test chip.

表 1 测试芯片和量子电压噪声源芯片中不同尺寸结阵特性
Table 1. Properties of Josephson junction arrays in different sizes in test chip and QVNS chip.

Chip 类型	结面积/ $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$	I_c /mA	J_c /kA·cm ⁻²	R_n /m Ω
Test chip	5 × 5	2.3	9.2	9.7
	6 × 6	3.2	8.9	6.4
	7 × 7	4.3	8.8	4.6
	8 × 8	5.5	8.6	3.5
	9 × 9	6.6	8.2	2.8
	11 × 11	9.2	7.6	2.0
QVNS chip	6 × 12	6.1	8.3	3.5

3.2 量子电压噪声源芯片 (QVNS chip)

以上 test chip 中 $8\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$ 和 $9\ \mu\text{m} \times 9\ \mu\text{m}$ 结阵的 I_c 值能够预估出 QVNS chip 中 $6\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ 结阵的相应值进入 I_c 目标值区域 (5—8 mA), 可进一步进行 QVNS chip 的测试. 采用如图 3 所示的方式对芯片进行连接, 量子电压噪声源芯片置于紫铜背板上, 芯片通过超声压焊与印刷电路板 (PCB) 板相连接, PCB 板置于屏蔽套筒内并通过微波传输线 (数字脉冲信号输入) 及铜镍合金线 (合成信号输出) 连接至探测杆上端接线盒, 测试时探测杆下端杆体浸于液氮杜瓦内, 上端接线盒与测试系统连

接. 对量子电压噪声源芯片的测试分为两步, 首先对结阵的交流、直流 $I-V$ 特性进行测试; 若结阵交流、直流 $I-V$ 特性满足要求, 则用量子电压噪声源芯片合成具有量子精度的单频交流信号来对其信号合成能力进行验证.

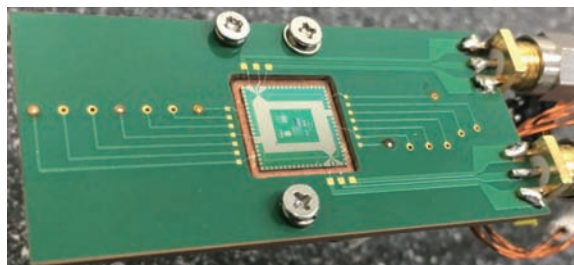


图3 量子电压噪声源芯片的封装

Fig. 3. Package of the quantum voltage noise source chip.

图4为4.2 K温度下量子电压噪声源芯片中某支路约瑟夫森结阵的直流及交流 $I-V$ 特性曲线. 图中蓝色曲线为直流 $I-V$ 曲线, 红色为微波辐照下交流 $I-V$ 曲线. 在两路结阵中施加电流, 取图1所示的任一信道端口与地之间的回路(即两结阵之一)测量电压, 即可得到此路包含有四个约瑟夫森结的结阵 $I-V$ 特性. 从直流 $I-V$ 曲线可以看出, QVNS chip 中 $6 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 结阵的 I_c 为6.1 mA, 符合此前预期. 根据公式 $V = n \cdot f / K_J$, 其中 n 为约瑟夫森结的个数, 本文 $n = 4$; K_J 为约瑟夫森常数, $K_J = 483597.9 \text{ GHz/V}$ [19]; V 为台阶电压值; f 为频率. 在频率5 GHz微波辐照下, 4个约瑟夫森结应产生幅值为 $41.36 \mu\text{V}$ 的1级电压台阶, 本测试中单次扫描 $I-V$ 曲线测量 -1 级和 $+1$ 级台阶再平均后得到的1级台阶幅值为 $41.44 \mu\text{V}$, 与理论值误差约为1.9%, 多次测试平均后可获得更低的误差. 此结果表明量子电压噪声源芯片上的约瑟夫森结阵性能良好, 可以进一步对其进行合成交流量子电压的测试.

随后, 在量子噪声温度计测试系统 [20,21] 上对量子电压噪声源芯片进行了脉冲驱动性能的测试. 实际工作的量子电压噪声源芯片应该输出幅值随机(高斯统计分布)、相位随机的噪声信号, 但本文使其合成具有量子精度的单频交流信号, 以便在频域分析其合成的信号来考察量子电压噪声源芯片是否正确地工作在脉冲驱动模式下. 量子电压噪声源芯片如果能够合成单频交流信号, 也将能够合成幅值随机(高斯统计分布)、相位随机的噪声信号用于精密测量玻尔兹曼常数. 图5为对

量子电压噪声源施加脉冲信号之后所产生的频率为100 kHz、幅度为 $0.5 \mu\text{V}$ 的单频正弦信号的频谱. 脉冲驱动信号在数字编码前是理论上完美的正弦信号, 频谱上应该是在100 kHz处一个单峰, 无其他频率的谐波. 数字脉冲信号经过信号发生器发出后不可避免地会引入幅度噪声和相位噪声. 通过约瑟夫森结阵的完美滤波, 应该输出具有量子精度的100 kHz交流量子电压信号. 而输出信号的幅度完全由量子脉冲的编码密度、取样频率和结的个数确定, 幅度对时间的积分可精确到 $n \cdot h/2e$, 其中 n 是约瑟夫森结个数, h 为普朗克常数, e 为电子电荷, $h/2e = 2.067834 \text{ mV} \cdot \text{ps}$, 即量子磁通. 因此合成的信号是具有量子精度的. 由图5可见测试获得的合成信号频谱非常纯净, 无谐波和干扰信号, 这表明本文所研制的量子电压噪声源芯片的动态响应良好, 能成功合成单一频率的交流量子电压信号, 可为后续量子噪声法精密测量玻尔兹曼常数提供核心器件支撑.

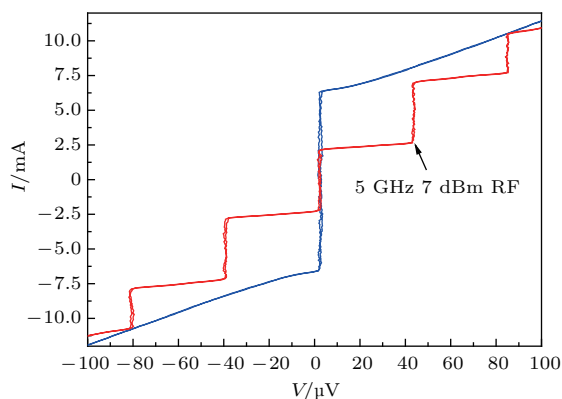


图4 4.2 K下量子电压噪声源某支路的直流及交流 $I-V$ 特性曲线

Fig. 4. DC and AC $I-V$ curves of one array in quantum voltage noise source at 4.2 K.

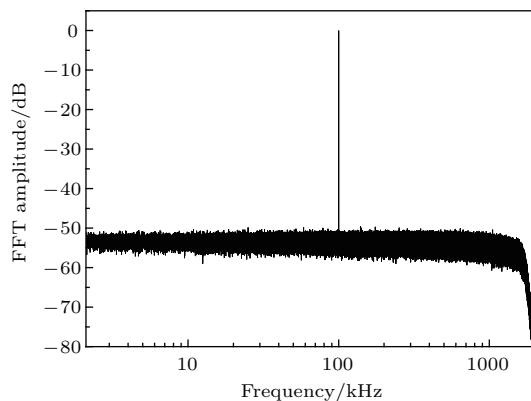


图5 脉冲下量子电压噪声源生成信号频谱

Fig. 5. Signal spectrum generated by the pulse driven quantum voltage noise source.

4 结 论

研制了基于Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb超导约瑟夫森结阵的量子电压噪声源芯片. 芯片中的约瑟夫森结阵交直流 I - V 特性良好, 采用脉冲驱动模式合成了具有量子精度的100 kHz单频交流量子电压信号. 实验结果表明本文所研制的量子电压噪声源芯片可使用脉冲驱动合成任意波形, 可为后续玻尔兹曼常数精密定值及复现热力学温度提供基础. 未来将进一步改进芯片的设计和封装, 以及优化测试探杆, 提高量子电压噪声源的使用灵活性和长期稳定性.

参考文献

- [1] Preston-Thomas H 1990 *Metrologia* **27** 3
- [2] Mills I, Mohr P, Quinn T, Taylor B N, Williams E R 2006 *Metrologia* **43** 227
- [3] CCT <http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CCT/CCT27.pdf> [2017-12-19]
- [4] Nyquist H 1928 *Phys. Rev.* **32** 110
- [5] Johnson J B 1927 *Nature* **119** 50
- [6] Brixy H 1971 *Nucl. Instrum. Methods* **97** 75
- [7] Jeanneret B, Benz S P 2009 *Eur. Phys. J. Special Topics* **172** 181
- [8] Benz S P, Dresselhaus P D, Martinis J M 2003 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **52** 545
- [9] Benz S P, Dresselhaus P D, Burroughs C J 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 681
- [10] Nam S W, Benz S P, Dresselhaus P D, Burroughs C J, Tew W L, White D R, Martinis J M 2005 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **54** 653
- [11] Mohr P J, Taylor B N, Newell D B 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 1527
- [12] Yamazawa K, Urano C, Yamada T, Horie T, Yoshida S, Yamamori H, Kaneko N, Fukuyama Y, Maruyama M, Domae A, Tamba J, Kiryu S 2014 *Int. J. Thermophys.* **35** 985
- [13] Maezawa M, Yamada T, Urano C 2014 *J. Phys.: Conf. Ser.* **507** 042023
- [14] Cao W H, Li J J, Zhong Q, Guo X W, He Q, Chi Z T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 170304 (in Chinese) [曹文会, 李劲劲, 钟青, 郭晓玮, 贺青, 迟宗涛 2012 物理学报 **61** 170304]
- [15] Watanabe M, Dresselhaus P D, Benz S P 2006 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** 49
- [16] Olaya D, Dresselhaus P D, Benz S P, Bjarnason J, Grossman E N 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 144
- [17] Liu J S, Li J Y, Li T Z, Li T F, Wu W, Chen W 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 245
- [18] Wang L R, Zhong Y, Li J J, Cao W H, Zhong Q, Wang X S, Li X 2018 *Mater. Res. Exp.* **5** 046410
- [19] Quinn T J 1989 *Metrologia* **26** 69
- [20] Zhou K L 2017 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [周琨荔 2017 博士学位论文(北京: 清华大学)]
- [21] Qu J F, Fu Y F, Zhang J Q, Rogalla H, Pollarolo A, Benz S P 2013 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **62** 1518

Development of quantum voltage noise source chip for precision measurement of Boltzmann constant*

Wang Lan-Ruo¹⁾ Zhong Yuan^{2)3)†} Li Jin-Jin^{2)3)‡} Qu Ji-Feng²⁾ Zhong Qing²⁾³⁾
Cao Wen-Hui²⁾³⁾ Wang Xue-Shen²⁾³⁾ Zhou Zhi-Qiang²⁾ Fu Kai²⁾ Shi Yong²⁾

1) (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100089, China)

2) (National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

3) (Key Laboratory of the Electrical Quantum Standard of AQSIQ, Beijing 100029, China)

(Received 13 December 2017; revised manuscript received 19 February 2018)

Abstract

The Johnson noise thermometer is used to precisely measure Boltzmann constant by comparing the thermal noise caused by charge movement and the quantized voltage reference noise synthesized by the quantum voltage noise source (QVNS). The QVNS signal is synthesized based on quantized voltage pulses produced by two channels of superconducting Josephson junction arrays, which are designed for cross-correlation electronics. The Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb Josephson junction is used as a core device of QVNS chip in this work for its non-hysteretic current-voltage (I - V) characteristics and conveniently adjustable barrier parameters.

In this paper, we present the design consideration, fabrication process, and measurement results of the QVNS chip. The QVNS chip contains two Josephson junction arrays, each consists of four $6\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ junctions and is embedded in a $50\ \Omega$ coplanar waveguide transmission line. The random noise in signals from the two driven channels is eliminated by cross-correlation, and then an accurate quantum noise is obtained. Test chips with different areas of Josephson junctions are also designed on the same mask, aiming at estimating the variation range of I_c . The typical fabrication process for voltage standard chips in our laboratory is used for preparing the QVNS chip.

The sample is measured at 4.2 K. The DC I - V curve shows that the critical current I_c is 6.1 mA. The I - V characteristics of the junctions under 5 GHz microwave radiation are measured. For a series array of four junctions, a 41.44 μV one-stage Shapiro step is observed. Calculation shows that the error between the measurement and theoretical value of 41.36 μV is about 1.9%, which means that the QVNS chip performs well under microwave radiation and can be used for synthesizing the AC quantum voltage reference noise.

A single-frequency 100 kHz sinusoidal waveform is synthesized by the QVNS chip under pulse driven signal. A spectrum of the synthesized sinusoidal waveform shows a single peak, which means that the digital pulse signal is perfectly filtered by Josephson junction arrays and the synthesized signals possess quantum accuracy. The results indicate that our chip has good dynamic response and works well in synthesizing a single-frequency AC quantum voltage signal. This work can provide core devices for the noise thermometry system and support the precise measurement of Boltzmann constant as well as redefinition of Kelvin in future. As a next step, the design and package will be further improved, and the probe module will be optimized to reduce the measurement uncertainty.

Keywords: Boltzmann constant, quantum voltage, quantum noise thermometry, Josephson junction

PACS: 85.25.Cp, 74.40.De, 74.25.Sv, 06.20.Jr

DOI: 10.7498/aps.67.20172643

* Project supported by National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFF0200402) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61771441, 61701470).

† Corresponding author. E-mail: zhongyuan@nim.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jinjinli@nim.ac.cn