

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289126

研究課題名(和文) ジョンソン雑音温度計のための集積型量子電圧雑音源

研究課題名(英文) Integrated quantum voltage noise source for Johnson noise thermometers

研究代表者

山田 隆宏 (YAMADA, TAKAHIRO)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号：00377871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：熱力学温度測定方式の一つであるジョンソン雑音温度計測法(JNT)の高性能化のために、超伝導集積回路技術を用いた集積型量子電圧雑音源(IQVNS)を提案し開発した。IQVNSチップを作製し、その論理動作検証と擬似雑音波形の合成に成功した。また、IQVNS型JNT測定装置を開発し、それを使用した水の三重点とガリウム融点の測定に成功し、不確かさそれぞれ28 ppm、38 ppmを得ることができた。測定システムの改善等により、不確かさを低減できると考えられる。本研究によりIQVNSが実証されたことで、JNTの実用性、魅力、重要性が増していくものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We proposed and developed an integrated quantum voltage noise source (IQVNS) based on a superconducting integrated circuit technology to increase performance of Johnson noise thermometry (JNT). We implemented IQVNS chips and successfully confirmed digital circuit operation and pseudo-noise waveform synthesis. We also developed an IQVNS-JNT prototype measurement system and successfully measured the temperatures of the triple point of water and the melting point of gallium with relative uncertainties of 28 ppm and 38 ppm, respectively. Improvement of the JNT system will decrease the uncertainties. These results mean that the IQVNS will make JNT more useful, attractive and important in thermal metrology.

研究分野：超伝導デバイス

キーワード：熱力学温度 温度計測 ジョンソン雑音温度計 超伝導集積回路 単一磁束量子回路 ジョセフソン接合

1. 研究開始当初の背景

メートル条約の下の国際単位系(SI)の7つの基本単位のうち、4つが近い将来に改訂される見通しとなった。熱力学温度の単位ケルビンについては物理定数の1つであるボルツマン定数(k)を基準とした定義となる。各国では、水の三重点という器物に依存した現行のケルビンの定義と、新たな k に基づく定義との間で矛盾が発生しないよう、様々な方式の熱力学温度計を開発して k の高精度な測定を行い、それらの結果を国際度量衡委員会 CIPM にて集積し、複数独立の測定方式による検証を含めた改定に向けた万全な準備をしている[1]。

一方、単位の定義とは別に SI の下で一般に実用される現行の 1990 年国際温度目盛 ITS-90 がある。ITS-90 では温度定点(定義定点)の温度値を国際協約として定義し、所定の方法で補間を行っている。採択された当時は熱力学温度(絶対温度)の最良近似だったものの、その後の科学技術の進展や、今回の基礎物理定数 k に基づく定義の変更予定に伴い、普遍的な熱力学温度値(T)との差異を再評価しなければならない時期がきているといえる。CIPM では定義変更後も当面の間は ITS-90 を変更しない方針だが、単位の定義と実用される目盛との乖離は科学として不自然で、基礎データを蓄積した上でこれらが一致する方向への改訂を提案すべきと考えている。

図1に現在公表されている様々な熱力学温度の測定方式をまとめた。各方式は、不確かさと適用温度領域で長短を持つ。ジョンソン雑音温度計測法(Johnson Noise Thermometry: JNT)は、広温度範囲に渡って適用可能で、プローブ形状が通常の温度計のそれと近く扱いやすいなどの特長を有する。米国 NIST の提案による量子電圧雑音源(Quantum Voltage Noise Source: QVNS)の導入により 2000 年代前半に急速に改良が進んだ[2]。現時点で不確かさの観点では必ずしも最良の方法ではないが、広温度領域に適用できる有望な方式として、注目されている。産業技術総合研究所計量標準総合センター(NMIJ/AIST)でも科研費基盤 A [3]において、 k 、水の三重点等の高精度評価を目指して研究を進めている[4, 5]。本研究は、従来の JNT 技術をさらに高度化して測定精度を向上し、ケルビン再定義後の温度定点再評価の科学的データ蓄積への寄与を目指す。

図2は、量子電圧雑音源(QVNS)を用いた JNT 装置の概略である。QVNS が出力する基準擬似雑音 v_0 で校正した測定系で抵抗 R のジョンソン雑音 $\langle v_R^2 \rangle$ を相互相関法により測定し、ナイキストの式 $\langle v_R^2 \rangle = 4kTR\Delta f$ から熱力学温度 T を決定する。QVNS 出力の擬似雑音電圧 v_0 はジョセフソン接合アレーで量子化され、その波形が正確に決定されていることが重要である。ここで、 $\langle v_0^2 \rangle$ は、基準クロック周波数 f 、単一磁束量子 Φ_0 、ジョセフソン接合ア

レー段数や擬似雑音系列に依存して正確に決定される定数 Q により $\langle v_0^2 \rangle = Q\Phi_0^2 f^2$ と表される。NMIJ/AIST のこれまでの研究で[3]、従来の QVNS では、多くの高周波機器から構成されるため、ジョセフソン接合アレーに入力する擬似雑音系列パルスがケーブル間クロストークなどで出力に結合し、擬似雑音電圧波形 v_0 の精度が劣化することが明らかになった。この v_0 の精度劣化は、最終的な温度測定不確かさ増加の主因の一つである。また、擬似雑音系列の生成・検証は、膨大な計算コストを要し、JNT に様々な制約を課している。

これらの問題の解決を目指し、QVNS を超伝導集積回路で実現することを提案する。擬似雑音系列発生回路とジョセフソン接合量子化器を同一チップ上に集積し、高シールド効率超伝導ストリップ線で接続することでクロストークによる波形精度劣化を除去する。また、デジタル回路で擬似雑音系列を測定実時間で生成し、計算コストに付随する問題を排除する。さらに、高額な大容量メモリ内蔵高速パルスパターン発生器が不要になり、システムの低コスト化を実現できる。

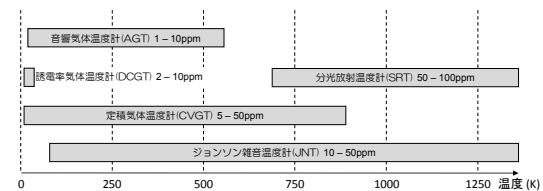


図1 熱力学温度測定方式。

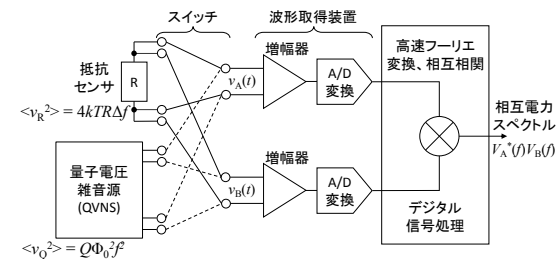


図2 QVNS-JNT 測定装置。

2. 研究の目的

本研究では、JNT の不確かさ低減、低コスト化、利便性向上を目指し、超伝導集積回路技術により集積型 QVNS(Integrated QVNS: IQVNS)を実現することを目的とする。また、IQVNS-JNT 測定装置を開発し、水の三重点(TPW)とガリウム融点の2つの温度定点を測定し、不確かさ 10 ppm を目標とする。

3. 研究の方法

本研究の方法は、IQVNS チップ開発、IQVNS-JNT 装置開発、熱力学温度測定の3点に大別される。本章では以下、これらについて順に述べる。

(1) IQVNS チップ開発

TPW、ガリウム融点を測定するために、電

カスペクトル密度 (PSD) それぞれ $1.508552 \times 10^{-18} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 、 $1.672875 \times 10^{-18} \text{ V}^2/\text{Hz}$ をもつ基準雑音源が必要となる。これらの雑音を出力可能な 2 種類の IQVNS チップを開発する。

IQVNS は、クロック分周器、擬似雑音符号系列 (M 系列) 発生器、雑音の PSD 調整のためのパルス数増倍器、高精度波形出力のための電圧増倍器で構成され、すべて超伝導単一磁束量子 (RSFQ) 回路により実現し 1 チップに集積する。2 種類の IQVNS チップそれぞれに対し、パルス数増倍器のパラメータを調整することで、TPW とガリウム融点の各測定条件に適合させる。RSFQ 回路の安定動作とジッタ抑制のために、タイミングエラー耐性の高いカウンターフロックロク分配方式を採用する。また、動作マージンの狭い一部の回路において、上下 2 つのグラウンド面で回路を挟む構造を採用し浮遊インダクタンスを低減し、動作マージン拡大を図る。回路設計には、CONNECT セルライブラリ・ツール[6]を用いた。

チップ作製には、臨界電流密度 $2.5 \text{ kA}/\text{cm}^2$ Nb/AlO_x/Nb ジョセフソン接合、4 層配線の AIST 標準 II プロセス[7]を用いる。また、チップ作製後は、JNT 測定に使用可能なチップを選別するための機能試験を行う。

(2) IQVNS-JNT 装置開発

熱力学温度測定のために、図 2 の JNT 装置を開発する。

測定対象の温度定点を実現するために、TPW セルとガリウム融点セルを使用する。また、これらの温度を測定するために $100 \text{ } \Omega$ 抵抗センサを使用する。

図 2 における QVNS には、(1) で述べた IQVNS チップを用いる。IQVNS チップをチップキャリアに実装し、マイクロ波同軸ケーブル、電圧読み取り線、バイアス電流供給線等を接続する。これを極低温プローブに取り付けて、液体ヘリウムに浸して冷却する。外来雑音を極力減らすために、バッテリー駆動型のバイアス電流源を開発する。高周波クロック源として、マイクロ波発振器を使用する。

抵抗センサと IQVNS の雑音波形を低雑音測定するために、波形取得装置、相互相関器が必要である。いずれも、科研費基盤 A[3] で開発した従来型 QVNS-JNT 測定装置で開発したものをベースとし、増幅器とその周辺回路の改良を行う。

(3) 熱力学温度測定

TPW 測定のために、TPW セルと TPW 用 IQVNS チップを使用する。抵抗センサを TPW セルに設置し、IQVNS にはバイアス電流とクロックを供給し、両雑音源から雑音波形を発生させて、スイッチ切り替えにより交互に測定する。各波形は波形取得装置により取得され、高速フーリエ変換と相互相関演算により相互電力スペクトルに変換される。最終的に、得られた両雑音スペクトルをデータ解析により

比較して TPW 測定結果を得る。

ガリウム融点についても、ガリウム融点セルとガリウム融点用 IQVNS チップを使用して、TPW 測定と同様の方法で測定を行う。

4. 研究成果

(1) IQVNS チップ開発

IQVNS チップ評価の結果、TPW 用、ガリウム融点用ともに完全動作を確認できた。バイアス電流マージン (動作範囲) はそれぞれ $79 \text{ mA} \sim 113 \text{ mA}$ 、 $92 \text{ mA} \sim 122 \text{ mA}$ と、実用上十分広い値を得た。ジョセフソン接合数はいずれも 1131 接合である。IQVNS チップの顕微鏡写真と論理動作波形を、それぞれ図 3、4 に示す。

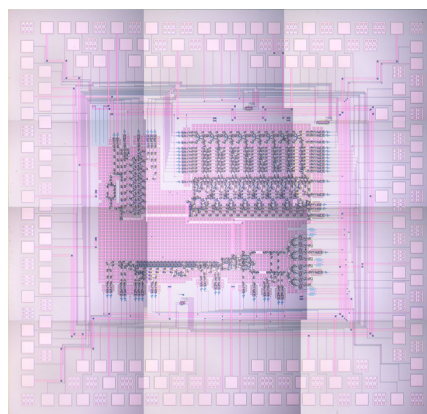


図 3 IQVNS チップの顕微鏡写真。サイズは 5 mm 角。

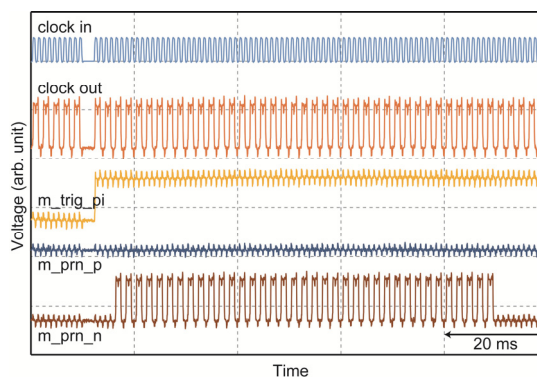


図 4 IQVNS 論理動作波形。

(2) IQVNS-JNT 装置開発

図 5 に、開発した IQVNS-JNT 装置写真を示す。主に、波形取得装置、IQVNS、被測定物から構成される。被測定物には、TPW セルまたはガリウム融点セルに設置された抵抗センサを用いる。

(3) 熱力学温度測定

TPW 用 IQVNS の擬似雑音波形合成と、その相互電力スペクトルの測定に成功した。IQVNS の雑音スペクトルを、TPW に設置された抵抗センサのそれとともに図 6 に示す。各スペクトルの測定時間は 4.6 時間 である。IQVNS のスペクトルは、抵抗の熱雑音と同様

の白色特性をもつことがわかる。データ解析の結果、TPWの測定結果は273.1556 Kであり、相対的な不確かさは28 ppmであった。

ガリウム融点用 IQVNS チップの開発が遅れたため、本研究ではTPW用 IQVNS チップで代用してガリウム融点測定を行った。不確かさが若干大きくなるが、データ解析時に補正することで対応可能である。IQVNS と抵抗センサの各スペクトルの測定時間は2.8時間である。データ解析の結果、ガリウム融点の測定結果は302.9179 Kであり、相対的な不確かさは38 ppmであった。

測定の不確かさは、研究開始当初の目標値10 ppmより大きい結果となった。系統的な不確かさと統計的な不確かさが主要因と考えられる。前者については、波形取得装置やケーブル伝達特性等に起因すると考えており、現在対策を検討中である。後者については、測定時間を増やすことで減らすことができると考えられる。これらの対策を施すことで10 ppm以下を達成できると考えている。

また、本研究を進めていく中で、IQVNS の新たな利点も判明した。開発した IQVNS は、M 系列符号に基づいているため、長い周期(高い周波数分解能)の擬似雑音を容易に合成することができる。実際、今回開発した IQVNS の周波数分解能は1 Hz と、従来型 QVNS の典型値10 Hz に対して10 倍高い。これは、IQVNS を使用することで、連続スペクトルをもつ抵抗の熱雑音により近い擬似雑音を得られることを意味する。

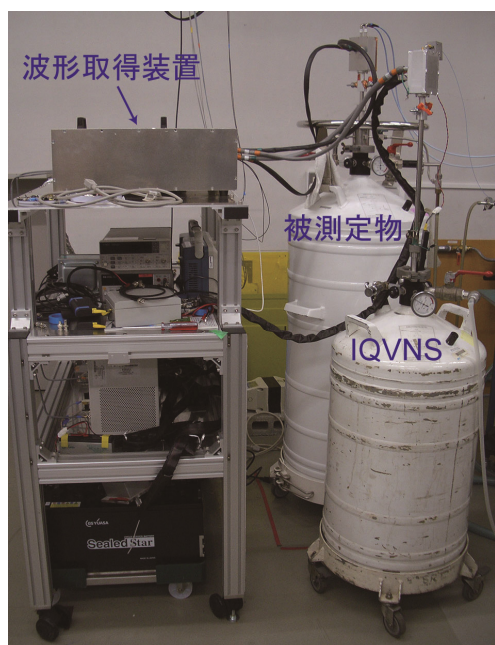
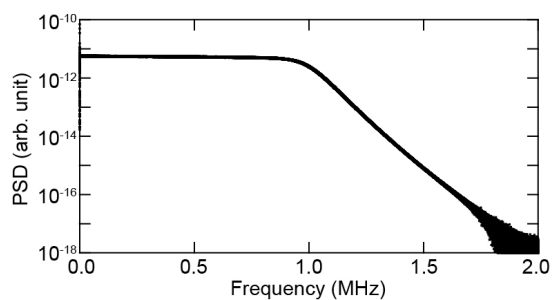


図5 IQVNS-JNT 装置写真。

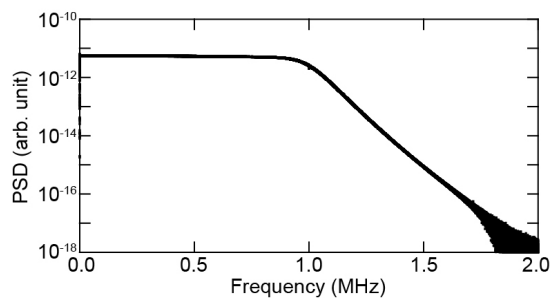
(4) まとめ

JNT の不確かさ低減、低コスト化、利便性向上を目指して、IQVNS-JNT 装置を開発し、それをを用いた熱力学温度測定の実証を行った。超伝導集積回路技術を用いた IQVNS チッ

プの開発に成功し、その論理動作検証、擬似雑音波形の合成、雑音スペクトルの測定に成功した。開発した IQVNS-JNT 装置を使用した TPW とガリウム融点の測定にも成功し、相対的な不確かさそれぞれ28 ppm、38 ppm を得ることができた。システムの改善等により不確かさを低減できると考えられる。また、IQVNS の利点として、高い周波数分解能を得られる点が新たに判明し実証もされた。広温度領域に適用可能な利点をもつ JNT 測定方式に IQVNS の利点が新たに加わることで、複数温度定点の系統的測定に繋がると考えられる。超伝導集積回路技術の有効性実証と新規応用開拓にも繋がると考えられる。



(a)



(b)

図6 (a)抵抗センサ、(b)IQVNS の雑音スペクトル。

<引用文献>

- [1] J. Fischer et al., Int. J. Thermophys., vol. 32, no. 1-2, pp. 12-25, Jan. 2011
- [2] S. P. Benz et al., Metrologia, vol. 48, no. 3, pp. 142-153, June 2011
- [3] 科研費基盤研究 (A) 「ジョセフソン効果と量子ホール効果を基準とした熱力学温度測定技術の開発」 [課題番号: 22246013]
- [4] N. Kaneko et al., IEICE Trans. Electron., vol. E-94C, no. 3, pp. 273-279, March 2011
- [5] K. Yamazawa et al., Int. J. Thermophys., vol. 35, no. 6-7, pp. 985-998, Jul. 2014
- [6] S. Yoroazu et al., Physica C, vol. 378-381, part 2, pp. 1471-1474, Oct. 2002
- [7] S. Nagasawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 5, no. 2, pp. 2447-2452, Jun. 1995

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① 浦野 千春、山田 隆宏、前澤 正明、山澤 一彰、岡崎 雄馬、福山 康弘、金子 晋久、山森 弘毅、丸山 道隆、堂前 篤志、丹波 純、吉田 俊介、桐生 昭吾、Johnson Noise Thermometry Based on Integrated Quantum Voltage Noise Source, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有、vol. 26, no. 3, 2016, 1800305 (5pp), DOI: 10.1109/TASC.2016.2524472
- ② 前澤 正明、山田 隆宏、浦野 千春、Improved design of integrated quantum voltage noise source, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有、vol. 26, no. 3, 2016, 1800504 (4pp), DOI: 10.1109/TASC.2016.2525990
- ③ 山田 隆宏、浦野 千春、前澤 正明、Demonstration of Johnson noise thermometry with all-superconducting quantum voltage noise source, Applied Physics Letters, 査読有、vol. 108, no. 4, 2016, 042605 (4pp), DOI: 10.1063/1.4940926
- ④ 山田 隆宏、前澤 正明、浦野 千春、Design and test of component circuits of an integrated quantum voltage noise source for Johnson noise thermometry, Physica C, 査読有、vol. 518, 2015, pp. 85-88, DOI: 10.1016/j.physc.2015.02.046
- ⑤ 前澤 正明、山田 隆宏、浦野 千春、Integrated Quantum Voltage Noise Source for Johnson Noise Thermometry, Journal of Physics: Conference Series, 査読有、vol. 507, 2014, 042023 (4pp), DOI: 10.1088/1742-6596/507/4/042023
- ⑥ 前澤 正明、Integrated Quantum Voltage Noise Source - Creating Beautiful Noise, Superconductivity Web21, 査読無、February 2014, 2014, pp. 14-15, http://www.istec.or.jp/web21/pdf//14_02/E-all.pdf
- ⑦ 前澤 正明、集積型量子雑音電圧源 - 美しい雑音を作る-、超電導 Web21、査読無、2013 年 10 月号、2013、pp. 11-12、http://www.istec.or.jp/web21/pdf/13_10/all.pdf
- ⑧ 前澤 正明、山田 隆宏、浦野 千春、集積型量子雑音電圧源のスペクトル密度の計算、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、vol. 113, no. 149, 2013, pp. 33-38

[学会発表] (計 7 件)

- ① 浦野 千春、山田 隆宏、前澤 正明、山澤 一彰、岡崎 雄馬、福山 康弘、金子 晋久、山森 弘毅、丸山 道隆、堂前 篤志、丹波

純、吉田 俊介、桐生 昭吾、Johnson Noise Thermometry Based on Integrated Quantum Voltage Noise Source, 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2015), 2015 年 9 月 8 日、リヨン (フランス)

- ② 前澤 正明、山田 隆宏、浦野 千春、Improved design of integrated quantum voltage noise source, 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2015), 2015 年 9 月 8 日、リヨン (フランス)
- ③ 山田 隆宏、前澤 正明、浦野 千春、Design and test of component circuits of an integrated quantum voltage noise source for Johnson noise thermometry, 27th International Symposium on Superconductivity (ISS 2014), 2014 年 11 月 27 日、タワーホール船堀 (東京)
- ④ 山田 隆宏、浦野 千春、Design of an Integrated Quantum Voltage Noise Source for Johnson Noise Thermometry, 6th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2013), 2013 年 11 月 22 日、産総研 (つくば市)
- ⑤ 前澤 正明、山田 隆宏、浦野 千春、Integrated Quantum Voltage Noise Source for Johnson Noise Thermometry, 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), 2013 年 09 月 17 日、ジェノバ (イタリア)
- ⑥ 山田 隆宏、前澤 正明、浦野 千春、An Xic-based design environment for RSFQ circuits, 8th FLUXONICS RSFQ Design Workshop 2013, 2013 年 09 月 23 日、イルメナウ (ドイツ)
- ⑦ 前澤 正明、山田 隆宏、浦野 千春、集積型量子雑音電圧源のスペクトル密度の計算、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2013 年 07 月 22 日、機械振興会館 (東京)

[その他]

<https://unit.aist.go.jp/neri/sscg/ja/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 隆宏 (YAMADA, Takahiro)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員
研究者番号: 00377871

(2) 研究分担者

浦野 千春 (URANO, Chiharu)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号: 30356589

(3)連携研究者

前澤 正明 (MAEZAWA, Masaaki)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノ
エレクトロニクス研究部門・主任研究員
研究者番号：40357976

金子 晋久 (KANEKO, Nobuhisa)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理
計測標準研究部門・研究グループ長
研究者番号：30371032

山澤 一彰 (YAMAZAWA, Kazuaki)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理
計測標準研究部門・研究グループ長
研究者番号：30306873

日高 睦夫 (HIDAKA, Mutsuo)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノ
エレクトロニクス研究部門・上級主任研究員
研究者番号：20500672