

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05615

研究課題名（和文）量子超越性を実証する超伝導スピントロニクス大規模量子計算回路の創出

研究課題名（英文）Large-scale superconducting spintronics quantum computing circuits toward the realization of quantum supremacy

研究代表者

山下 太郎 (Yamashita, Taro)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60567254

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 156,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究により、超伝導と磁性のハイブリッド構造による超伝導スピントロニクス素子「 $\pi$ -接合」を導入した新規な量子計算回路を創出した。量子ビットとして、世界に先駆けて磁束バイアスフリーな磁束型量子ビット（量子ビット）実証と性能向上を達成した。制御回路についても、接合導入により低消費電力化が可能な半磁束量子回路や、低消費電力な量子ビット制御回路を実証した。そして、モノリシック量子計算回路における磁束量子パルスによる量子制御実証にも成功し、量子超越性実証のための大規模量子計算回路に向けた基盤技術確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により実証・創出した、バイアス不要で集積化に適した量子ビットや、超低消費電力性を示す新規超伝導量子制御回路、そしてそれらをオンチップ化したモノリシック量子計算回路は、大規模集積化が進行中の超伝導量子計算機の実現に向け、現状の量子計算機の大規模化における配線数増大を始めとする主要課題群を解決へと導く、新しい超伝導スピントロニクス量子技術という意義を有する。本技術が超伝導量子計算機の大規模化に向けたブレークスルーとなることが期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed novel quantum computing circuit by introducing a superconducting spintronic element " $\pi$ -junction" with a hybrid structure of superconductor and ferromagnet. As a quantum bit, we demonstrated a flux-bias-free flux-type quantum bits (pi-qubits) for the first time and improved their performance. For quantum control circuits, we have demonstrated a half-flux-quantum circuits to achieve the ultralow power consumption by introducing the  $\pi$ -junction, and also quantum control circuits with low power consumption. We finally succeeded in demonstrating the quantum control using flux-quantum pulses in monolithic quantum computing circuits, and established the fundamental technology for large-scale quantum computing circuits to realize the quantum supremacy.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：量子計算 超伝導 超伝導スピントロニクス モノリシック素子

### 1. 研究開始当初の背景

既存計算機を凌駕する圧倒的な計算速度への期待から、量子計算機開発が全世界的に過熱している。その中で、超伝導量子回路は多量子ビット化と集積化に優れており、古典計算機に対する優位性を意味する量子超越性実証の本命と目されている。量子ビットの性能指標としては、量子状態の寿命を表すコヒーレンス時間が重要だが、超伝導量子ビット単体のコヒーレンス時間(寿命  $T_1$ )は数10マイクロ秒に達し、1999年の量子ビット発明当時に比べ10万倍超改善されている。量子超越性実証には、多量子ビットからなる大規模量子計算回路を作製し、有意な量子アルゴリズムを実行することが必須となる。ところが、大規模化するとコヒーレンス時間が低下するという致命的なトレードオフが存在し、これが量子回路の実現を妨げている。このトレードオフの本質原因は未解明で、解明に向けどのようなアプローチがあるのかも明確ではない。

トレードオフの原因として以下の可能性がある：(i) **配線数増大による熱・雑音流入**：超伝導量子ビットは希釈冷凍機に配置され数mKの極低温で動作する。現状では、量子ビット動作に必要な磁場印加や、状態制御を室温からの配線を通じて行う。そのためビット数増加に伴う配線数の増加により、配線を通じて室温から流入する雑音や熱が量子回路を攪乱する。(ii) **最適動作点の不均一性**：量子ビットのパラメータのばらつきにより、コヒーレンス時間が最長となる外部磁場の大きさ(最適動作点)の不均一性により大規模化が困難となる。(iii) **ビット間干渉**：量子ビット間の望まぬ干渉等、回路設計の不完全さが回路全体としてコヒーレンス時間低下につながる。以上の抜本的解決が大規模量子計算回路の実現に向けた課題である。

### 2. 研究の目的

上記課題に対し本研究チームは、最適動作点のばらつきを本質的に抑制できる  $\pi$  量子ビット及び究極的な低消費電力性が期待される半磁束量子(Half Flux Quantum; HFQ)回路のアイデア、これらを実現するための基盤技術である磁性ジョセフソン接合( $\pi$ 接合)技術を有する。本研究では本技術で上述の大規模化における課題(i)-(iii)を解消するため、以下を目的に設定した。

#### (1) 磁束バイアスフリーな $\pi$ 量子ビット

提案した  $\pi$  量子ビットを実証しこれを備えた量子回路を実現する。 $\pi$  量子ビットの実現により、磁束型量子ビットで必須だった磁束バイアスが不要となる。量子ビットには、コヒーレンス時間へ悪影響を与える酸化物を排除した窒化ニオブ(NbN)ベースの  $\pi$  接合を用いる。 $\pi$  量子ビットは、**磁場ゼロが最適動作点となるため課題(ii)が根本解決、磁束バイアス用配線が不要となり(i)も軽減する**。また  $\pi$  量子ビットは、**ビット間干渉低減の肝となる大きな非調和性を有するため、課題(iii)の解決にも貢献する**。

#### (2) 究極的な低消費電力性を示す制御回路技術

**課題(i)の解決**には、量子回路の制御・読み出し配線数の低減が必須である。これには、**制御回路と量子ビットのモノリシック化による極低温制御が必須**である。本研究チームが提案した、 $\pi$  接合によりスイッチングエネルギーが10zJと従来の1/100以下となることが期待されるHFQ回路技術を確立する。これにより、10,000接合からなる回路でも1 $\mu$ W程度の発熱に抑えられ、**限られた冷却能力の希釈冷凍機で動作可能となり、モノリシック化可能な制御回路が実現する**。

#### (3) 量子ビットと制御回路を実装した大規模モノリシック量子計算回路

上記の  $\pi$  量子ビット及び制御回路をモノリシック化した量子回路の実現に挑戦し課題(i)-(iii)を解消する。 $\pi$  量子ビットのコヒーレンス時間を保持しつつ制御回路を同一チップ上に実装する新規構造と、これを実現する作製プロセスの確立等、極めて高度な技術が要求される。最終的には、100量子ビット級の大規模モノリシック回路と量子超越性の実証を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) $\pi$ 量子ビット

長い量子寿命  $T_1$  を有する量子回路を実現するため、酸化物を排除したNbNベースの  $\pi$  接合を組み込んだ  $\pi$  量子ビット開発を進めた。図1に示すように、3つのジョセフソン接合(0接合、超伝導/絶縁層/超伝導接合)に、位相シフタとして機能する  $\pi$  接合(超伝導/磁性層/超伝導接合)を融合した構造を採用した。コヒーレンス時間律速の要因解明のため、**材料や読み出し共**

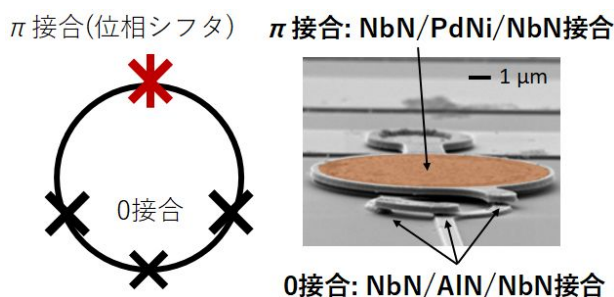


図1:  $\pi$  量子ビットの概要図と作製素子写真。

振器構造の異なる 3 種類の  $\pi$  量子ビットの開発を並行して進めた。特性評価は 10 – 20 mK に冷却可能な希釈冷凍機により、周波数領域測定による磁束バイアスフリー動作検証と非調和性評価、時間領域測定によるコヒーレンス特性評価を行った。

#### (2) 低消費電力制御回路

量子ビットとモノリシック化可能な HFQ 回路の開発を進めた。超伝導回路の発熱は回路へのバイアス電流量で決まるため、HFQ 回路での  $\pi$  接合導入と低電流密度化により電流量を極限的に抑制できる。NbN ベースの  $\pi$  量子ビットとのモノリシック化に必須となる NbN 接合回路の開発を行った。これにより  $\pi$  量子ビットと同じ 40 A/cm<sup>2</sup> の低電流密度化が可能となり、従来回路に対し 1/100 以下の究極的な低消費電力化に取り組んだ。評価は、HFQ 回路の基本となる半磁束量子伝搬検証、多量子ビット制御回路動作と低消費電力性検証を進めた。HFQ 回路とは異なるが交流断熱駆動型の低消費電力な多量子ビット制御回路開発も進めた。

#### (3) モノリシック回路

$\pi$  量子ビットと制御回路のモノリシック化に取り組んだ。チップ内で 2 次元的に量子ビット部と制御回路部を分け、その間を超伝導高周波配線で接続した隣接型モノリシック構造を採用し、異なる回路を同一基板に作製するための高度なモノリシック回路構造及びプロセスを開発した。量子超越性実証のための量子アルゴリズム Simultaneous Quantum Messages Protocol (SQMP) を実装した、4 結合  $\pi$  量子ビットを 1 ユニットとし全 20 ユニットからなる 80 量子ビットと、4 ビット制御回路をオンチップ化したモノリシック回路を試作し、モノリシック回路要素の動作実証と特性評価を進めた。並行して、外乱に敏感なモノリシック回路評価のため、究極的な雑音対策を施した希釈冷凍機システムの構築を進めた。評価は本システムにより、磁束バイアスフリー動作検証、制御回路からの磁束量子パルスによる  $\pi$  量子ビット駆動検証、コヒーレンス特性評価を通じてモノリシック回路動作検証を行い、モノリシック化によるコヒーレンス特性への影響について検証した。

### 4. 研究成果

研究項目ごとに、得られた研究成果について詳細を述べる。

#### (1) $\pi$ 量子ビット

Al 接合と NbN ベース  $\pi$  接合のハイブリッド型に加え、モノリシック回路実現に必須となるオール NbN 型  $\pi$  量子ビット (図 1) を作製した。コヒーレンス律速の本質を調べるため、オール NbN 型  $\pi$  量子ビットの読み出し共振器としては、モノリシック回路にも用いる 2 次元共振器とは異なる構造も作製し、計 3 種類の  $\pi$  量子ビットを開発した。評価は全て温度 20 mK 以下の希釈冷凍機により行った ( いずれの成果も論文投稿中または準備中のため、図は不掲載 )。

##### 【成果 1】磁束バイアスフリー動作実証

量子ビット周波数の磁場依存性を測定し (周波数領域測定)、周波数が最小となる最適動作点 (コヒーレンス時間が最大となる磁場) を調べた。その結果、最適動作点がほぼゼロ磁場 (従来型では半磁束量子相当の磁場) にあることを実証し、磁束バイアスフリー動作に成功した。磁束型量子ビットのバイアスフリー動作は世界初であり、磁場下では動作しない超伝導回路とのモノリシック化を可能とする新しい量子ビットを創出した。

##### 【成果 2】高コヒーレンス及び高非調和性達成

次に、時間領域測定によりコヒーレンス特性を評価した結果、全ての  $\pi$  量子ビットが 1.0 – 1.7 マイクロ秒の優れたコヒーレンス時間 (寿命  $T_1$ ) を達成した。先行研究で報告された  $\pi$  接合付き磁束型量子ビットでは、コヒーレンス時間が測定不能なほど短かったため、世界初の結果である。また、 $\pi$  接合付き位相型量子ビットの先行研究では 4 ナノ秒が報告されており、400 倍以上の飛躍的な性能向上に相当する。さらに、量子状態の制御速度を決める非調和性については最大で 1.6 GHz が得られ、現在主流のトランズモン量子ビットに比べ約 5 倍の優位性が明らかとなった。量子ビットの性能指標であるゲート忠実度は、凡そコヒーレンス時間と非調和性 (制御速度) の積で決まる。実証した  $\pi$  量子ビットは、コヒーレンス時間が 5 – 10 マイクロ秒のトランズモンと同程度のゲート忠実度となり、トランズモンの標準的な性能に迫る値となる。そして大規模化においては GHz 級の高い非調和性により、トランズモンで懸念されるビット間干渉や多重読み出し時の周波数衝突を回避可能なため、 $\pi$  量子ビットの優位性となる。

##### 【成果 3】コヒーレンス時間の本質解明と性能向上への $\pi$ 接合開発

3 種類の  $\pi$  量子ビット評価の結果、 $\pi$  接合以外の接合材料 (Al or NbN) や、読み出し共振器の構造及び材料には依存せず、同等のコヒーレンス時間を示した。さらに、 $\pi$  接合を含まない従来の磁束型量子ビットの評価から、3 種類ともに  $\pi$  量子ビットよりも 1 桁程度長いコヒーレンス時間を示すことが分かった。以上から、 $\pi$  量子ビットのコヒーレンス時間を決定する物理的要因は



$\pi$  接合自体のエネルギー散逸であることが示唆された。この結果を受け、 $\pi$  接合のエネルギー散逸を記述する理論モデルで定量解析した結果、実験結果と同程度のコヒーレンス時間が得られ、性能を決定する要因が  $\pi$  接合における損失であることを特定した。

以上、磁束バイアス不要、優れたコヒーレンス時間と大きな非調和性を有し、大規模集積性に優れた  $\pi$  量子ビットを創出した。

## (2) 低消費電力 HFQ 回路/制御回路

### 【成果 4】HFQ 伝搬動作と低電力化実証

量子ビット制御回路に先立ち、HFQ 回路の基本原理解である HFQ 伝搬動作実証のため、0 接合を超伝導ループに 2 つ含む通常の超伝導量子干渉素子 (SQUID) と、0-0- $\pi$  接合ループを 2 つ含む HFQ-SQUID を作製し、臨界電流の外部磁束依存性を評価した (図 2(a))。その結果、SQUID では通常の磁束量子 ( $\Phi_0$ ) 周期の変調パターンが得られたのに対し、HFQ-SQUID では半分の周期である半磁束量子 ( $\Phi_0/2$ ) 周期の変調が観測された。これは、HFQ 回路が確かに半磁束伝搬動作している証左であり、NbN-HFQ 回路として初実証に成功した。そして、この HFQ 回路では  $\pi$  接合により臨界電流が従来型の約 1/2 に低減した上、NbN による超低電流密度 40 A/cm<sup>2</sup> 接合を用いたことで、目標であった 1/100 以下の低消費電力化を達成した。ここでは熱雑音の大きな 4.2 K での評価用に HFQ による臨界電流低減をあえて 1/2 程度で設計したが、制御回路は熱雑音が小さい mK 下で動作するため、さらに数 10 分の 1 の臨界電流 (~1  $\mu$ A) に設計し低消費電力化できる。

### 【成果 5】多量子ビット制御回路の実証

次に、多量子ビット制御回路として動作周波数を検証するため、磁束量子パルスを 2 分配する機能を有する HFQ 分周回路を作製し評価した。その結果、量子ビット制御に適用可能な、最大周波数 3 GHz での 2 分配動作実証に成功した。また、回路の消費電力は約 6 nW 程度となり、HFQ 回路導入と低電流密度化により、従来回路に比べ約 1/600 の究極的な低消費電力化を達成した。

以上の結果を受け、量子ビット制御回路の開発と希釈冷凍機評価システムの構築に着手した。モノリシック回路への実装を見据え、図 2(b) に示す 1 本の入力配線を通じて 4 量子ビット制御可能なスイッチ回路を開発した。HFQ-SQUID と同様低電流密度 40 A/cm<sup>2</sup> とすることで  $\pi$  接合なしでも 100 量子ビット級には十分な低消費電力性を有する。電流密度低減により動作周波数は低下するが、回路シミュレーションにより量子ビット周波数の 6 GHz で動作するように設計パラメータを最適化し、得られた設計指針により 4 量子ビット制御回路を設計した。外乱に敏感な回路評価のため、冷凍機全体を囲う室温磁気シールド等の徹底的な雑音対策を施した希釈冷凍機システムを構築した。その結果、温度 20 mK での 4 分岐動作実証に成功した (図 2(b))。実証した回路の消費電力は僅か 31 nW で、最大 2,000 量子ビット規模の制御回路が可能な拡張性を示した。更なる大規模化に対しては実証した HFQ による電力削減が可能だが、並行して交流断熱駆動型の新規多量子ビット制御回路を検討し要素回路実証に成功した。

以上より、2,000 量子ビット級とのモノリシック化が可能な超低消費電力性を有する制御回路の作製及び動作実証に成功した。

## (3) モノリシック量子回路

### 【成果 6】80 量子ビットモノリシック量子回路

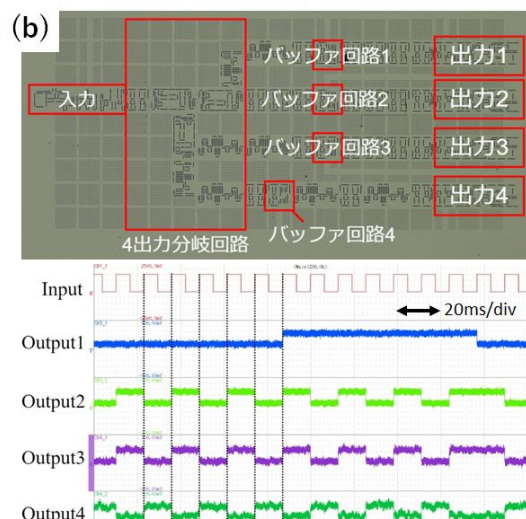
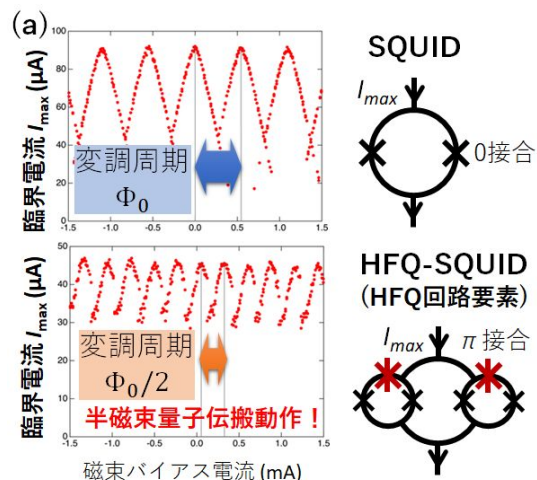


図 2: (a) HFQ 動作実証の実験結果. (b) 4 量子ビット制御回路と動作実証結果.

制御回路と量子ビットを基板上で分けた平面結合構造を考案し、抵抗やインダクタンス等多くの回路パラメータ抽出と条件出し、層間絶縁ショート問題等の克服を経て、20以上の工程からなるモノリシック回路作製プロセスを構築した。そして、量子アルゴリズム（後述）を実装した80個の $\pi$ 量子ビットを備えたモノリシック回路の試作に成功した（図3）。最近接続型4量子ビットを1ユニット（全20ユニット）とし、成果5で述べた4量子ビット制御回路により駆動される。従来の量子ビット単体では制御用の高周波配線だけで80本必要だったが、制御回路とのモノリシック化により24本まで配線数を削減することに成功した。回路全体の消費電力は $0.7\ \mu\text{W}$ で、冷凍機の冷凍能力 $20\ \mu\text{W}$ に対し十分な低消費電力性を示す大規模モノリシック回路となる。

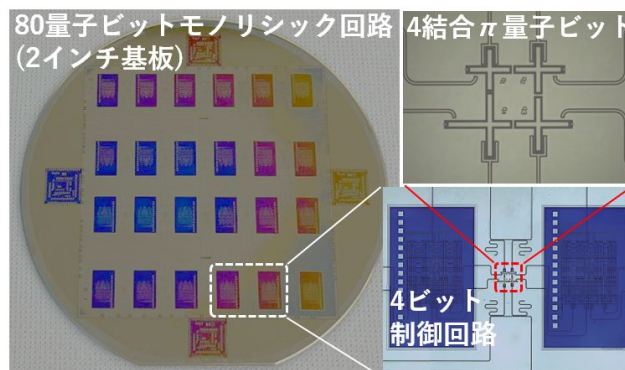


図3: 80個の $\pi$ 量子ビットと4量子ビット制御回路群を備えたモノリシック回路の素子写真。

### 【成果7】モノリシック回路動作実証と高コヒーレンス性達成

動作実証のため、大規模モノリシック回路の構成要素である量子ビット制御回路と $\pi$ 量子ビットのモノリシック回路（図4）を評価した（論文準備中のため、実験結果に関する図は不掲載）。まず周波数領域測定により、モノリシック回路における $\pi$ 量子ビットの最適動作点がゼロ磁場であること（磁束バイアスフリー動作）を実証した。制御回路は磁場下では動作不可能なため、モノリシック回路動作の必須条件となる。次に、制御回路から出力される磁束量子パルスによる量子ビット駆動を検証するため、磁束量子パルスの周波数（パルス間隔）に対する $\pi$ 量子ビットの応答を調べた。その結果、 $\pi$ 量子ビット周波数 $f_{01} = 5.7\ \text{GHz}$ における応答（共鳴）に加え、量子ビット周波数の整数分の一である $1.42, 1.90, 2.85\ \text{GHz}$ に対する応答を観測した。これは通常の量子ビット駆動では生じない現象であり、磁束量子パルスによる $\pi$ 量子ビット駆動の実証を意味する。

次に磁束量子パルスによる時間領域測定を行いモノリシック回路のコヒーレンス特性を評価した。その結果、 $\pi$ 量子ビット単体と同等の $1.4$ マイクロ秒の優れたコヒーレンス時間を達成した。懸念していたプロセス工程による素子ダメージや制御回路からの雑音に起因する、モノリシック化による性能劣化は観測されなかった。さらに、磁束量子パルスによる明瞭なラビ振動及びラムゼー干渉も観測し、制御回路による量子状態制御実証に成功した。

モノリシック回路として世界で2例目（国内では初実証）となる、量子分野の極めて重要な成果だが、先行研究（Leonard Jr.他, Phys. Rev. Appl. 2019）では、Nb制御回路とAlトランズモンの異種融合型を採用している。これは、異なる材料及び接合作製工程が混在するため拡張性が極めて乏しく、制御回路の電流密度も $1\ \text{kA}/\text{cm}^2$ で消費電力も大きい。さらにトランズモンの小さな非調和性により大規模化も困難である。これに対し、本研究で創出した全NbNモノリシック回路は、以上の問題を回避した真にスケーラブルな回路であり、本研究による最重要成果である。

さらに、量子計算量理論の専門家である西村治道教授（名古屋大学）と議論し、氏が発案した最小4量子ビットで実行可能な量子アルゴリズムSQMPを実装した。SQMPは忠実度評価により量子超越性の検証が可能な量子アルゴリズムである。4量子ビットSQMP回路を希釈冷凍機に実装し、忠実度測定のためのSQMPシーケンス作成と評価を進めたが、試作したチップでは量子ビット動作が確認できず、量子超越性に関しては期間内の実証には至らなかった。以上より、最終目標であった量子超越性実証は未達だったものの、大規模モノリシック回路の基盤技術確立と、低消費電力制御回路と $\pi$ 量子ビットのモノリシック回路動作・高コヒーレンス実証に成功した。

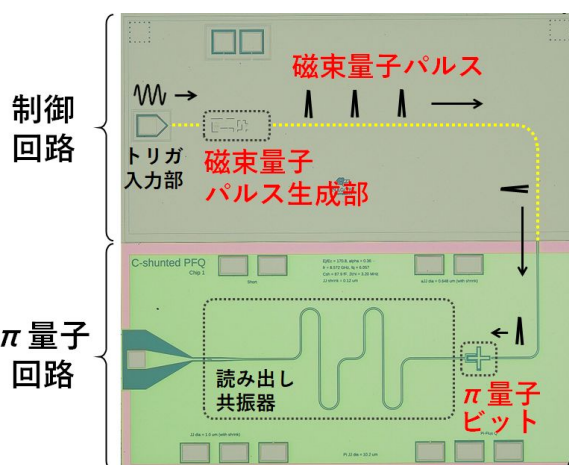


図4: 磁束量子パルス制御実証した制御回路と $\pi$ 量子ビットのモノリシック回路写真。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計35件（うち査読付論文 34件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Naoki Takeuchi, Mikiya Naruse, Shigeyuki Miyajima, Duong Pham, Hirotaka Terai, Masamitsu Tanaka, Taro Yamashita	4. 巻 124
2. 論文標題 NbN-based half-flux-quantum element for integration with superconducting qubits	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 152601-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0203046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sunmi Kim, Leonid V. Abdurakhimov, Duong Pham, Wei Qiu, Hirotaka Terai, Sahel Ashhab, Shiro Saito, Taro Yamashita, Kouichi Semba	4. 巻 -
2. 論文標題 Superconducting flux qubit with ferromagnetic Josephson pi junction operating at zero magnetic field	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 arXiv:2401.14597 (投稿中)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Pham Duong, Li Feng, Oba Kenjiro, Takeshita Yuto, Tanaka Masamitsu, Yamashita Taro, Fujimaki Akira	4. 巻 37
2. 論文標題 NbN-based tunnel-type $\pi$ -junctions for low-power half-flux-quantum circuits	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 055004 ~ 055004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ad3c9c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Pham Duong, Sugimoto Riku, Oba Kenjiro, Takeshita Yuto, Li Feng, Tanaka Masamitsu, Yamashita Taro, Fujimaki Akira	4. 巻 12
2. 論文標題 Weak spin-flip scattering in Pd89Ni11 interlayer of NbN-based ferromagnetic Josephson junctions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-10967-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miyajima Shigeyuki, Yamashita Taro, Tanaka Masamitsu, Takeuchi Naoki, Inomata Kunihiro, Terai Hirotaka	4. 巻 33
2. 論文標題 Fabrication Process for Monolithic Integration of a Nitride Superconductor-Based Superconducting Qubit with a Single Flux Quantum Control Circuit	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2023.3241270	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Sunmi, Terai Hirotaka, Yamashita Taro, Qiu Wei, Fuse Tomoko, Yoshihara Fumiki, Ashhab Sahel, Inomata Kunihiro, Semba Kouichi	4. 巻 2
2. 論文標題 Enhanced coherence of all-nitride superconducting qubits epitaxially grown on silicon substrate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-021-00204-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamashita Taro	4. 巻 -
2. 論文標題 Magnetic Josephson junctions: new phenomena and physics with diluted alloy, conventional ferromagnet, and multilayer barriers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2020SUI0004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamashita Taro, Kim Sunmi, Kato Haruki, Qiu Wei, Semba Kouichi, Fujimaki Akira, Terai Hirotaka	4. 巻 10
2. 論文標題 phase shifter based on NbN-based ferromagnetic Josephson junction on a silicon substrate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-70766-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計182件（うち招待講演 44件 / うち国際学会 96件）

1. 発表者名 Taro Yamashita
2. 発表標題 NbN-based ferromagnetic $\pi$ -junctions and their application to quantum circuits
3. 学会等名 Spintronics XIV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>山下研究室ホームページ  <a href="https://super.apph.tohoku.ac.jp/">https://super.apph.tohoku.ac.jp/</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹内 尚輝  (Takeuchi Naoki)  (00746472)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・量子・AI融合技術ビジネス開発グローバル研究センター・主任研究員   (82626)	
研究分担者	田中 雅光  (Tanaka Masamitsu)  (10377864)	名古屋大学・工学研究科・准教授   (13901)	
研究分担者	猪股 邦宏  (Inomata Kunihiro)  (50525772)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・量子・AI融合技術ビジネス開発グローバル研究センター・研究チーム長   (82626)	



6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮嶋 茂之  (Miyajima Shigeyuki)  (50708055)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所神戸フロンティア研究センター・主任研究員    (82636)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計5件

国際研究集会 Joint workshop of QCCC2023, SSV2023, and IWSQMD2023	開催年 2023年～2023年
国際研究集会 The Joint Workshop of 14th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2021) and 3rd Workshop on Quantum and Classical Cryogenic Devices, Circuits, and Systems (QCCC 2021)	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 2nd Workshop on Quantum and Classical Cryogenic Devices, Circuits, and Systems (QCCC 2020)	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 1st workshop on Quantum and Classical Cryogenic Devices, Circuits, and Systems (QCCC 2019), 名古屋大学, 2019年11月12-13日	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 The 2022 JSPS 146th Committee International Symposium on Superconductor Electronics jointed with SSV2022 and QCCC2022	開催年 2022年～2022年

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関