

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的
量子技術基盤の創出」
研究課題「超伝導人工原子を使った光子ベースの
量子情報処理」

研究終了報告書

研究期間 2016年10月～2022年3月

研究代表者: 蔡 兆申
(東京理科大学理学部第一部
物理学科 教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究は東京理科大チーム、理研チーム、そして産総研・東北大の連合チームの三者の共同研究で進めてきている。東京理科大チームと理研チームは共同で、従来方式と比べ更にシンプルで新規な超伝導量子ビットの回路アーキテクチャの創出に取り組み、東京理科大チームと産総研・東北大の連合チームは、超伝導量子チップに必要な、低損失の超伝導回路、特に共振器の高品質化の開発を共同で取り組んできた。

新規回路方式の共同研究の結果として、超伝導一方向量子コンピュータのアーキテクチャの創出に成功した。これはプロジェクト開始当初想定していた光子を介在させる回路方式に代わり、超伝導ゲート操作のみで簡便に実現できるという利点を備えた回路方式である。

超伝導共振器の高品質化の共同研究では、産総研・東北大の連合チームが超伝導共振器特性の超伝導材料、誘電体材料、および作製プロセス依存性を調べた。特にこれまで行われてこなかった中性イオンビームエッチング方式に注目した実験を行った。そこで作られた共振器を、東京理科大チームがそれらを極低温で共振特性評価するという分業を行った。その結果、Q 値が 10^6 程度の高品質な Nb の共振器が実現した。

それとは別に、東京理科大チームは産総研チームからは、共振器用の Nb 膜の供給を継続的に受けてきた。これは超伝導量子回路を作るうえで必要不可欠な要素であるので、重要な共同研究である。

このような共同研究を通じ、超伝導回路に基づく量子コンピュータの研究を、実験、理論、材料・作成プロセスなどの面から行ってきた。その結果、従来のものより実現が容易な、スケールアップ量子コンピュータの新規なアーキテクチャを創生するのに成功し、高効率単光子源、長寿命超伝導量子ビット、長寿命(高 Q 値)超伝導共振器、低損失な 3 次元局所配線であるエアブリッジなど、数々の量子コンピュータ実現に向けた要素技術を実現することに成功した。

更に東京理科大では、実際の超伝導量子コンピュータの要素技術を試作し、評価した。一方向量子コンピュータの開発では、 3×3 ビットアレイに相当する 18 ビットの一方向量子チップを実現した。疑似 2 次元ネットワークに必要なエアブリッジの作成技術を成熟させ、イールド 100% のプロセスを実現した。1 ビットと 2 ビットの高忠実度のゲート操作を実現し、シングルショット読み出しを 95% の高精度で実現した。それらを組み合わせ、一方向量子計算に必要なクラスター状態を、一次元時間領域において生成することに成功した。

疑似 2 次元ネットワークは、従来から研究されてきたゲートモデル量子コンピュータにも応用でき、その回路の実装を、全て 2 次元配線で実現できる大きな利点がある。そこで、ゲートモデルに基づく、 4×4 量子ビットアレイに相当する 16 ビットの集積量子チップを作成した。これを発展させ、現在 100 ビットの量子チップの作成に取り組んでいる。

このような、比較的大きな集積量子チップのためのチップホルダーを作成した。また SINIS(超伝導体-正常金属絶縁体-超伝導体)接合を利用した超伝導量子ビットの新規な高速初期化法を提案し、その研究を現在進めている。

また理研チームは、量子コンピュータに関わる他の様々な問題も研究している。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1.

概要:

ゲートモデル量子計算器新規アーキテクチャ:ゲートモデルの超伝導万能型量子計算器の基本アーキテクチャを新規に提案した。これはエアブリッジを含んだ疑似 2 次元結合ネットワークを取り入れた回路方式で、従来のアーキテクチャに対し以下のような利点がある。①入出力線が、完全に 2 次元配線で実現でき、従来型の複雑な 3 次元配線が必要なくなる;②入出力線と量子ビット結合線が完全に分離できる;③回路はすべて従来のモノリシック回路技術で実

現できる。この成果の特許の申請を行った。

2.

概要:

一方向モデル量子計算器新規アーキテクチャ: クラスタ状態を生成して万量子コンピューティングを行う、新規なアーキテクチャを創生することに成功した。これは超伝導量子回路を基にした、一方向量子計算モデルに基づく万量子計算器である。先行するゲートモデルに基づく超伝導万量子コンピュータの既存アーキテクチャと比べ、回路をすべて通常の2次元平面でのレイアウトで実現できるという大きな利点を有する。また回路の演算は、すべて既存の量子ゲート操作で実現でき、当初想定していた高度な単光子の生成と検出は必要がない。この成果の特許の申請を行った。

3.

概要:

時間領域1次元クラスタ状態生成: 超伝導量子回路を使い、時間領域での1Dクラスタ状態の生成に成功した。2つの物理的量子ビットのみにより、4量子ビットの相当の線形クラスタ状態を、59%の高忠実度をもって生成することに初めて成功した。生成された4量子ビットは完全多体エンタングルメント状態にあることを確認した。物理的超伝導量子ビットの数よりも大きいビット数のエンタングル状態を生成することが可能であることを示し、将来的にはエラー訂正可能な3Dクラスタの生成が可能となる。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1.

概要:

スケーラブル集積量子コンピュータチップ実現: 「擬2次元ネットワーク」を使い、量子コンピュータ用の集積超伝導量子ビットチップを試作した。18量子ビットの3 x 3の量子ビットアレー（一方向計算対応）と16量子ビットの4 x 4量子ビットアレー（表面コードにも対応）を実現した。この新規アーキテクチャの特徴は、量子ビットは全てチップの周辺部に位置している。したがって量子ビットへの配線は、従来型の平面パッケージング技術が使える大きな利点がある。

2.

概要:

量子ビットと超伝導共振器の高品質化: バファード弗酸(BHF)後処理技術により、量子ビットの寿命を約3~4倍向上させることを実現した。T1とT2はおおよそ50 ~ 60 μ 秒までの長寿命化が達成した。Nb超伝導共振器も、BHF処理や中性イオンビームエッチングなどの工程を使うことで、内部損失を大幅に削減することを達成し、Q値を100万程度まで向上させた（従来の約3倍）。

3.

概要:

超伝導エアブリッジ技術: 「擬2次元ネットワーク」の実現や、超伝導伝送線・共振器の高性能化と低クロストーク化に必要な、低損失な超伝導エアブリッジの技術開発を行った。AlとNb超伝導エアブリッジを、ほぼ100%のイールドで実現する技術を確立した。20ビット級の超伝導量子チップの動作が可能な大型のチップホルダー作成を行った。12.5mm角と15mm角の2種の20ポートを持つチップホルダーを試作した。

< 代表的な論文 >

1. Hiroto Mukai, Keiichi Sakata, Simon J Devitt, Rui Wang, Yu Zhou, Yukito Nakajima, and Jaw-Shen Tsai, *“Pseudo-2D superconducting quantum coupling circuit for the surfacecode: proposal and preliminary tests”*, New Journal of Physics, 22, 043013, 2020

概要: ゲートモデルの超電導万能型量子計算器の基本アーキテクチャを新規に提案した。これはエアブリッジを含んだ疑2次元結合ネットワークを取り入れた回路方式で、従来のアーキテクチャに対し以下のような利点がある。①入出力線が、完全に2次元配線を実現でき、従来型の複雑な3次元配線が必要なくなる; ②入出力線と量子ビット結合線が完全に分離できる; ③回路はすべて従来のモノリシック回路技術で実現できる。

2. Teruaki Yoshioka, Jaw-Shen Tsai, *“Fast unconditional initialization for superconducting qubit and resonator using quantum-circuit refrigerator”*, Appl. Phys. Lett. 119, 124003, 2021

概要: SINIS(超伝導体-正常金属絶縁体-超伝導体)接合部を量子ビットと共振器からなる結合系に結合することにより、単光子アシストトンネリングによって共振器から光子を除去し、共振器の有効な緩和速度を増加させる超伝導量子ビットの高速初期化法を提案した。シミュレーションにより、SINIS 接合部の電子温度が 10mK の場合、量子ビットは 80ns で 99% の忠実度、137ns で 99.9% の精度で初期化できることを示した。

3. Yu Zhou, Zihui Peng, Yuta Horiuchi, O.V. Astafiev, and Jaw-Shen Tsai, *“Tunable Microwave Single-Photon Source Based on Transmon Qubit with High Efficiency”*, Physical Review Applied, 13, 034007, 2020

概要: オンデマンドなマイクロ波単光子源の光子生成率を、ほぼ100%近い高精度に高めることに成功した。これは従来の超電導磁束量子ビットに代わり、電荷量子ビット(トランズモン型)及び低損失なシリコン基板を使った回路で達成した。単光子の干渉を示すHanbury-Brown-Twiss実験を行い、この光子源の優れた単光子性を確認した。二つの単光子源を並べて作成し、両方の光子源の単光子生成効率はともに97.7%、緩和時間もともに約21nsであり、素子性能にばらつきが少ないことを実証した。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 東京理科大グループ

研究代表者: 蔡 兆申 (学校法人東京理科大学理学部第一部物理学科 教授)

研究項目(超伝導量子回路)

- 単光子源
- 単光子計測
- 可変結合器
- 時間領域エンタングルメント
- 空間領域エンタングルメント
- スケーラブル回路
- 小型クラスター状態の生成

② 理研グループ

主たる共同研究者: NORI FRANCO (国立研究開発法人理化学研究所開拓研究本部 Nori

理論量子物理研究室 グループディレクター)

研究項目(量子情報理論)

- 基本となるプロトコル
- アーキテクチャのモデル
- 小型アプリケーションの設計
- 実験パラメータと系の性能評価のアーキテクチャ
- 実験グループによる小型クラスター状態の操作

③ 産総研グループ

主たる共同研究者:日高 睦夫(国立研究開発法人産業技術総合研究所デバイス技術研究部門超伝導デバイス研究グループ 招聘研究員)

研究項目(超伝導集積化プロセス)

- 超伝導共振器プロセス開発
- 超伝導共振器作製
- 超伝導集積回路プロセス開発
- 集積化超伝導量子光学回路作製

④ 東北大グループ

主たる共同研究者:寒川 誠二(国立大学法人東北大学・流体科学研究所・未到エネルギー研究センター・グリーンナノテクノロジー研究分野 教授)

研究項目(超低損傷プロセス)

- 超伝導共振器プロセス開発
- 超伝導共振器作製
- 超伝導集積回路プロセス開発
- 集積化超伝導量子光学回路作製

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

東京理科大グループは、超伝導回路という切り口からは、国内外の主要なジョセフソンエレクトロニクスの研究チーム、研究者と密なネットワークを持っている。古典的な超伝導回路の国内の拠点である名古屋大学(藤巻研)、横浜国大(吉川研)、産総研などのグループとは特に強い連携関係を確立している。

量子情報という切り口からも、国内外の主要な研究チームとのネットワークが築かれている。特に超伝導量子回路に関しては、国内の有力な実験研究チームである東京大学(中村研)、NTT、NICT などとは共同研究を含め、密に連絡網を構築している。国外の超伝導回路の研究拠点との連携で、特に関係が強く、共同研究も密に行っているところは、MIT(Lloyd 研)、Lincoln 研究所(Oliver 研)、Royal Holloway London University/Moscow Institute of Physics and Technology (Astafiev 研)、Lancaster 大学(Pashkin 研)、湖南教育大学(彭智慧研)、University of Technology Sidney(Devitt 研)、清華大学(劉玉璽研)、北京計算機研究センター(李鉄夫研)、上海 SIMIT(王鎮研)、UC Berkeley(Clarke 研)、Delft 工科大学(Mooij研)、Aalto 大学(Pekola 研)、Chalmers 工科大(Delsing 研)などなどが挙げられる。Lincoln 研究所の Oliver 教授からは、2 基の広帯域低雑音増幅器であるジョセフソン TWPA の供給を受けている。また Chalmers 工科大からは一部の超伝導量子回路のサンプル作成もしてもらっている。

特記できるのは、上記のうち CREST の招聘海外研究員として、Astafiev 教授、Devitt 教授、Lloyd 教授を東京理科大に招き、一方向量子計算に関する共同研究を行っている。

また超伝導量子回路以外の量子情報関連の国内外の研究拠点とも、理論研究、実験研究を含め、多様なネットワークを構築している。

企業に関わる連携に関しては、量子情報に関するものでは、NEC、日立、東芝、リクルートなどと連携関係を維持している。

理研の理論グループは、国内では、他の理研の量子情報のグループや、産総研、NIMS、大阪大学などの国内研究者との積極的かつ実りある連携を行っている。また日本産業界の東芝(特に Dr. Tetsufumi Tanamoto)、NEC、日立、NTT などと共同で協力し、30 以上の量子コンピューティング関連のトピックを中心とした論文を出版している。また国外に関しても、大変広い研究ネットワークを構築していて、CREST 研究期間中に国際共同研究の結果共著した論文が 200 件ほどある。