

# 研究終了報告書

## 「量子プロセッサの大規模化へ向けた量子インターコネクションの基盤技術の創成」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：猪股 邦宏

### 1. 研究のねらい

超伝導回路から構成される超伝導量子ビットは、固体素子ならではの集積性やマイクロ波による制御性、比較的容易な作製プロセス等が相まって最も研究が進んでおり、現在、量子コンピュータを実現し得る物理デバイスの最有力候補となっている。ところが、超伝導量子ビットのサイズは、その状態読み出し・制御に必要な付属回路や超伝導電極のサイズによってリミットされており、そのフットプリントは数  $\text{mm}^2$  となる。加えて、現在のプロセス技術では超伝導量子ビットを狙ったパラメータで作製可能なチップ面積には限りがあるため、量子ビットを一つのチップ上に大規模集積し、万能型量子コンピュータとしてパフォーマンスを発揮する量子ビット数の獲得は困難であると考えられる。

本研究では、希釈冷凍機内において空間的に離れた複数の小規模集積量子ビットチップ同士をマイクロ波単一光子の介在によって量子力学的に接続可能な量子インターコネクションの基盤技術の創成を目指す。この技術と分散型量子コンピューティングの概念を融合させることにより、万能型量子コンピュータの実現に必須となる量子プロセッサ大規模化の手段を確立することが本研究の大きなねらいである。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究課題において提案する量子インターコネクションでは、光子量子ビット(マイクロ波単一光子)と固体量子ビット(人工 $\Lambda$ 型原子)が必要となる。この固体量子ビットは、小規模集積量子チップにおいてインターフェースとして機能する。一方、光子量子ビットは小規模集積量子チップ同士を量子力学的に接続する役割を果たす。ある条件下において、光子量子ビットが固体量子ビットに反射されると、光子量子ビットが持つ量子情報と固体量子ビットのそれが交換される(SWAP ゲート)。固体量子ビットの情報を持った光子量子ビットは別の固体量子ビットと反射を繰り返すことで最初の固体量子ビットの情報を次の固体量子ビットにコピーすることが可能となる。また、固体量子ビット側の条件によっては、光子量子ビットの固体量子ビットにおける反射によって、両者の量子もつれ合い生成( $\sqrt{\text{SWAP}}$  ゲート)や Identity 操作が可能となる。固体量子ビットの駆動条件を変えることにより、光子量子ビットと固体量子ビット間に三種類のゲート実装が可能となるが、そのうちの二種類のゲート実装に成功し、光子量子ビットから固体量子ビット、固体量子ビットから光子量子ビットへの量子情報伝達、すなわち、双方向量子メモリの実証に成功した。(研究テーマ A)

本研究において取り扱う固体量子ビットは、マイクロ波共振器と超伝導磁束型量子ビットの着衣状態から実装される人工 $\Lambda$ 型原子である。量子インターコネクションにおいて小規模集積量子チップ間のもつれ合い生成の忠実度を高めるためには、超伝導磁束型量子ビットの長寿命化が必要である。同時に、マイクロ波共振器の内部 Q 値(共振器内部の光子の寿

命)の改善も重要となってくる。本研究では、磁束型量子ビットの設計とプロセスの改善により、寿命  $T_1 > 10 \mu\text{s}$  を超える量子ビットの作製に成功した。さらに、サンプルパッケージ内部の伝送特性の改善により、マイクロ波共振器の内部 Q 値が 10 GHz 帯域かつ入力光子数 $\sim 1$ において  $10^6$  を超えることを実証した。(研究テーマ B)

## (2) 詳細

### 研究テーマ A: 量子インターコネクションに向けた双方向量子メモリの実証

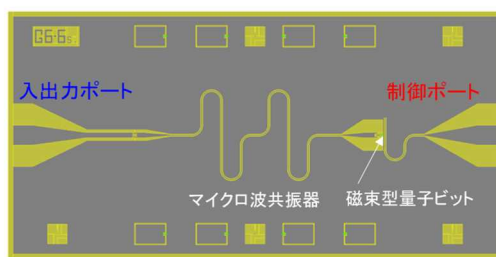
対象となる固体量子ビットは、図 1(a)示すマイクロ波共振器-磁束型量子ビットの結合系から実装される人工  $\Lambda$  型原子である。実験では、単一光子レベルの微弱な共振器入力に対する応答のみを取り扱うため、系のエネルギーは最低四準位のみが関与する[図 1(b)]。制御ポートから入力する量子ビット駆動パルスの周波数を適切に選択すると、図 1(c)に示すようにエネルギー準位は入れ子状態となる。駆動パルスパワーの適切な選択により、二組の輻射崩壊率 ( $\kappa_{41}$  と  $\kappa_{42}$ ,  $\kappa_{31}$  と  $\kappa_{32}$ ) が等しくなり、人工  $\Lambda$  型原子が実装される。この時、系に共鳴するマイクロ波パルス(周波数  $\omega_{41}$  もしくは  $\omega_{31}$ , ここで  $\omega_{ij}$  は  $|j\rangle \rightarrow |i\rangle$  の遷移エネルギー)を図 1(a)の入出力ポート(共振器側)から入力すると、入射マイクロ波光子は  $|1\rangle \rightarrow |4\rangle \rightarrow |2\rangle$  (もしくは  $|1\rangle \rightarrow |3\rangle \rightarrow |2\rangle$ ) のラマン遷移を受け周波数下方変換されるため、系に完全吸収される。この吸収ポイントをインピーダンス整合ポイントとよび、この測定によって人工  $\Lambda$  型原子の二つの遷移エネルギー  $\omega_{41}$  と  $\omega_{31}$  が同定される。系の状態が  $|2\rangle$  にあるとき、マイクロ波で系をプローブするとマイクロ波の周波数が  $\omega_{32}$  と  $\omega_{42}$  に等しいとき、ラマン遷移が生じプローブマイクロ波信号の吸収が起こる。この測定から、人工  $\Lambda$  型原子の残る二つの遷移エネルギーを同定した。

光子量子ビット(マイクロ波単一光子)から固体量子ビット(人工  $\Lambda$  型原子)への量子情報スワップ実証には、インピーダンス整合ポイントにおいて人工  $\Lambda$  型原子の二つのエネルギー  $\omega_{41}$ ,  $\omega_{42}$  に共鳴する二色のマイクロ波パルスを生成し照射する必要がある。この二色のマイクロ波パルスは、マイクロ波源からの連続波を任意波形発生器から出力されるガウシアンパルス、IF 周波数を適切に選択しミキシングすることで生成した。生成したパルスの状態は  $\alpha(|\omega_{41}\rangle + e^{i\phi}|\omega_{42}\rangle)$  と表すことができる。ここで、 $\sqrt{\alpha}$  はパルスの平均光子数  $n$ ,  $\phi$  は二つのパルス間の相対位相を表す。実験では、 $n$  を一定に保ち  $\phi$  をスイープしながら二色のマイクロ波パルスを量子ビット駆動パルスと同時に入射し、量子ビットの状態トモグラフィー測定を行った。図 1(d)に測定結果を示す。量子ビットの励起確率  $P(|e\rangle)$  が二色のパルスの位相差  $\phi$  に対し振動する結果を得た。各状態トモグラフィーパルスにおける  $P(|e\rangle)$  は、直交する軸(例えば、 $\pi(x)/2$  と  $\pi(y)/2$ ,  $-\pi(x)/2$  と  $-\pi(y)/2$ ) については  $\pi/2$  の位相で、反転する軸(例えば、 $\pi(x)/2$  と  $-\pi(x)/2$ ,  $\pi(y)/2$  と  $-\pi(y)/2$ ) については逆相で振動している。これは、二色のマイクロ波パルスの位相情報が量子ビット密度行列の非対角成分にスワップされたことを定性的に示しており、現在、定量的な解析を進めている。

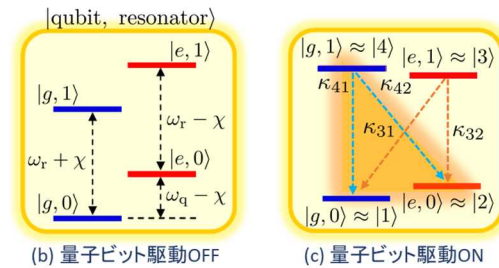
続いて、固体量子ビットから光子量子ビットへの量子情報スワップの実証実験を行った。この実験では、予め量子ビットを  $\pi/2$  回転させ位相情報を持たせた状態で人工  $\Lambda$  型原子を実装し、人工  $\Lambda$  型原子に共鳴な  $\omega_{41}$  もしくは  $\omega_{42}$  の単色マイクロ波パルスを照射する。人工  $\Lambda$  型原子に反射されたマイクロ波パルス信号は二色の周波数成分 ( $\omega_{41}$  と  $\omega_{42}$ ) を獲得するた

め、測定したマイクロ波パルスをフーリエ変換することによって両者の周波数成分の位相差を抽出した。その結果を図 1(e)の極座標グラフに示す。ここで、極座標の振幅は、反射マイクロ波パルスより抽出された $\omega_{41}$ と $\omega_{42}$ 成分の信号強度(振幅)である。量子ビットへ $\pi(x)/2 \rightarrow \pi(y)/2 \rightarrow -\pi(x)/2 \rightarrow -\pi(y)/2$ とゲート操作(=  $\pi/2$  ずつ回転させる)を行うと、反射マイクロ波パルス成分 $\omega_{41}$ と $\omega_{42}$ の位相差は量子ビットが持つ位相と同様に $\pi/2$ ずつ変化することを確認した。この実験結果は、固体量子ビットの位相情報が光子量子ビットへスワップされたことを裏付けるものである。

人工 $\Lambda$ 型原子をインターフェースとし、光子量子ビットから固体量子ビット、固体量子ビットから光子量子ビットへの量子情報伝達、すなわち、双方向量子メモリの技術の拡張により、量子インターコネクションの実現が可能となる。現在、マイクロ波光子により二つの量子ビットチップをインターコネクトする実験に取り組んでいる。

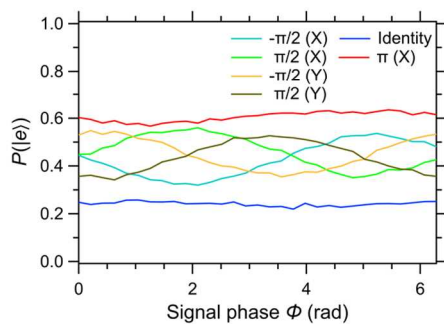


(a) マイクロ波共振器-磁束型量子ビット結合系のCAD図

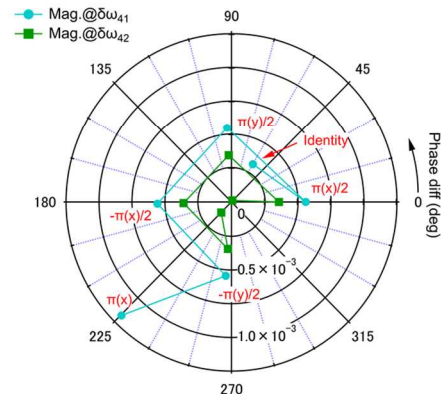


(b) 量子ビット駆動OFF

(c) 量子ビット駆動ON



(d) 光子量子ビットから固体量子ビットへの量子情報スワップ



(e) 固体量子ビットから光子量子ビットへの量子情報スワップ

図1. 量子インターコネクションに向けた双方向量子メモリの実証

### 研究テーマ B: 超伝導磁束型量子ビットとマイクロ波共振器内光子の寿命改善

人工 $\Lambda$ 型原子はマイクロ波共振器と超伝導磁束型量子ビットの着衣状態から実装されるため、両者の寿命改善は重要な課題となっている。超伝導ループを大きな電極の対向容量で shunt した C-shunt 型磁束量子ビットは、磁束揺らぎに対して鈍感となるため、その寿命  $T_1$  が一般的に長くなる。ところが、超伝導回路への大きな容量の追加は Transmon 型量子ビット同様、回路の非調和性を低下させ、目的によっては不都合をもたらす場合もある。本研究で実装する人工 $\Lambda$ 型原子は、従来型の磁束型量子ビットの大きな非調和性を利用するため、 $T_1$  の改善を目的とした回路への大きな容量追加は適さない。そこで、作製プロセスの改

善により従来型の磁束型量子ビットの  $T_1$  向上に取り組んだ。具体的には、デバイス作製プロセス中に HF を用いて基板や電極表面の酸化膜除去プロセスの追加を行い、Al と Nb 電極間コンタクトを bandage 電極で作製し基板表面のダメージを回避した。その結果、 $T_1$  が数  $\mu\text{s}$  から  $\sim 10 \mu\text{s}$  へと一桁の改善に成功した[図 2.(a)].

同様にマイクロ波共振器の内部  $Q$  値 ( $Q/\omega_r$  はマイクロ波共振器内の光子の寿命に相当) の改善を試みた。超伝導膜質の改善や基板洗浄プロセスの改善からは内部  $Q$  値の向上は見られなかったが、測定で使用しているサンプルパッケージの伝搬特性の改善により、内部  $Q$  値が単一光子レベルの入力に対して  $10^6$  を上回る結果を得た[図 2.(b)]. マイクロ波共振器の共振周波数は  $\sim 10 \text{ GHz}$  であり、この帯域における内部  $Q$  値  $> 10^6$  は世界的に見ても前例がない。

改善したサンプルパッケージの使用により、磁束型量子ビットの更なる寿命改善が期待される。

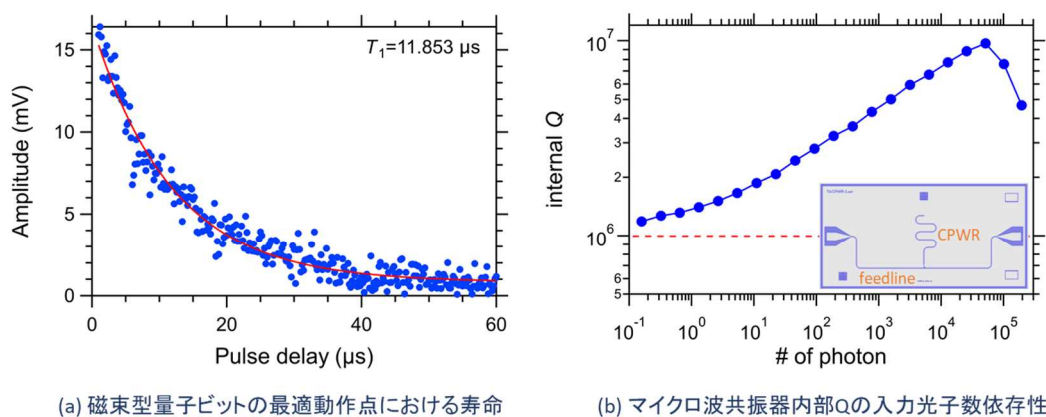


図2. 超伝導磁束型量子ビットとマイクロ波共振器の寿命改善

### 3. 今後の展開

本さがけ研究で実証した光子量子ビットと固体量子ビットの双方向量子メモリは、光子量子ビットを介した小規模集積量子チップを量子力学的にインターコネクトするコア技術となる。今後、この技術をより確実なものにするためには、マイクロ波単一光子源の開発や光子量子ビットと小規模集積量子チップを接続するマイクロ波サーキュレータの損失改善など、課題は多い。後者については、本さがけ研究でも取り組んでおり、引き続き、研究を継続する予定である。また、磁束型量子ビットの寿命改善プロセスや、マイクロ波共振器の内部  $Q$  値改善に効果を発揮したパッケージングの技術に関しては、現在行われている超伝導量子コンピュータの研究開発にフィードバックすることが可能で、効果の実証が期待される。このように、本さがけ研究で取り組んできた研究課題は、超伝導量子コンピュータの研究開発に必要な要素技術となっており、今後の発展と応用が期待される。

### 4. 自己評価

【目的の達成状況】

本さがけ研究で提案した量子インターコネクション技術の基盤となる光子量子ビットと固体量子ビットの双方向量子メモリの実証に成功した。また、固体量子ビットの構成要素である超伝導磁束型量子ビットの寿命改善やマイクロ波共振器の内部  $Q$  値改善にも取り組み、評価できる結果が得られた。これらの成果を論文化するための解析や考察を引き続き進める。また、本報告書では詳細について触れなかったが、固体量子ビットを複数個接続する際に用いられるマイクロ波サーキュレータの無損失化についても引き続き、研究を進める。

#### 【研究の進め方】

さがけ採択当初は実験環境が全く整っておらず、ひとりで全ての実験環境の立ち上げを行った。その結果、当初の予定よりも長い時間を実験環境整備に費やし、研究に遅れが生じた。また、実験試料作製では、イレギュラーなプロセスに取り組み、試料作製がなかなか進まなかった。限られた時間で効率的に研究を進めるための工夫を検討すべきだったと反省している。一方、予算については、実験系の立ち上げに計画通り無駄なく使用することができた。

#### 【研究成果の波及効果】

本さがけ研究で取り組んだ研究成果は、直ちに应用され社会の役に立つものではない。今後、何年か先に量子ビットの集積数が頭打ちになった際に应用され得る技術である。一方で、今回の研究成果が、別の視点や切り口から研究分野の発展に寄与する可能性もあると考えている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:0件

### (2) 特許出願

研究期間累積件数:0件(特許公開前のものも含む)

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

#### 【学会発表】\* 全て招待講演

#### 1. Kunihiro Inomata

“Microwave Quantum Optics: Waveguide QED with an artificial superconducting atom”,  
International Workshop on Recent Progress in Superconductivity (IWRS 2018), PyeongChang,  
Korea, Jul. 8 – 11, 2018.

#### 2. K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, T. Yamamoto, and Y. Nakamura

“Microwave single-photon detection based on dressed-state engineering”,  
IEEE MTT-S International Wireless Symposium, Guangzhou, China, May 19–22, 2019.

#### 3. 猪股 邦宏

「マイクロ波光子を介した固体量子ビットの量子インターコネクション」,  
応用物理学会・量子情報工学研究会, 2020/12/15.

#### 【受賞】

1. 未踏科学技術協会第 22 回超伝導科学賞(2018/4)
2. 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス第 146 委員会賞(2018/4)

【著作物】

猪股 邦宏, 河野 信吾, 中村泰信

「マイクロ波単一光子検出技術」

光学 第 49 巻, 第 9 号, pp.348-354.