

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H01831

研究課題名（和文）交差共鳴磁束バイアスによる超伝導量子ビット測定法の研究開発

研究課題名（英文）Cross-resonance-based readout scheme of a superconducting flux qubit

研究代表者

吉原 文樹 (YOSHIHARA, Fumiki)

東京理科大学・理学部第一部物理学科・教授

研究者番号：80525907

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：コヒーレンス特性と高い非調和性を兼ね備えたコンデンサ短絡型磁束量子ビットを対象とし、従来法である分散読み出し法より高速・高忠実度な量子ビット測定が可能な交差共鳴読み出し法の研究を行った。作製したサンプルを希釈冷凍機を用いて数10 mKに冷却し、交差共鳴法と従来手法である分散測定法との比較を行った。量子ビットが0状態の時と1状態の時との透過信号の複素振幅差を測定したところ、同じ測定時間において交差共鳴法の方が透過信号の複素振幅差が大きいという結果が得られた。この結果により、同じ測定時間において交差共鳴法の方が高い忠実度で0状態と1状態との読み出しを行える可能性があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

誤り耐性量子コンピュータを実現するには、量子エラー訂正が不可欠である。量子エラー訂正では、量子ビットの状態を短時間でかつ正確に測定し、その測定結果に応じて量子ビットゲート操作を行う必要がある。また、コヒーレンス特性に優れた量子ビットを使うことで少ない数の量子ビットで誤り耐性量子コンピュータの基本構成単位となる誤り耐性量子ビットを構築することが出来るようになる。本研究成果は、コヒーレンス特性に優れたコンデンサ短絡型磁束量子ビットと高速・高忠実度な量子ビット測定が可能な交差共鳴読み出し法の組み合わせの有効性を実験的に示したという点において学術的・社会的意義が大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：For capacitively-shunted flux qubits, which have good coherence property and large anharmonicity, we have studied the cross-resonance readout scheme. The cross-resonance readout scheme is expected to be faster and to have higher fidelity than the conventional dispersive readout scheme. A fabricated sample is cooled at a few tens of mK, and we evaluated the two readout schemes. At a fixed measurement time, the cross-resonance readout scheme shows larger complex amplitude difference than the dispersive readout scheme. This result indicates that the cross-resonance readout scheme has a potential to measure qubit state faster and with high fidelity.

研究分野：超伝導量子回路、量子情報

キーワード：超伝導量子ビット 量子ビット測定 交差共鳴

## 1. 研究開始当初の背景

分散シフトを用いた量子ビット測定法(分散シフト法)では双極子相互作用により量子ビットと共振回路とを結合させる。量子ビットの状態( $|0\rangle$ 状態か $|1\rangle$ 状態か)に応じて共振回路の共鳴周波数が逆方向にシフト(分散シフト)することを利用する。2012年のノーベル物理学賞を受賞した Haroche 教授らのグループが、1996年に Rydberg 原子と超伝導共振器とを用いた系で分散シフト法を実現している[1]。2004年に超伝導量子回路への適用を考えた形で理論提案[2]されて以来、ほぼ全ての超伝導量子ビット測定に用いられ、デファクトスタンダードとして定着している。ただ分散シフト法では量子ビットが $|0\rangle$ 状態の場合と $|1\rangle$ 状態の場合に生じる交流信号の位相差は小さく状態識別に時間がかかる。本研究提案である交差共鳴法では、量子ビットが $|0\rangle$ 状態の場合と $|1\rangle$ 状態の場合に生じる交流信号において180度の位相差が得られることから、分散シフト法より高速かつ低誤り率な量子ビット測定が期待できる。最近、トランズモン量子ビット測定において、類似の方法が実証された[3, 4]が、測定時間に関して優位性は得られていない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は量子ビット測定法について、構成と特性の関係を理論・実験の両面から明らかにし、高性能な量子ビット測定法を実現することである。超伝導量子ビットの一種である磁束量子ビットを測定対象とする。磁束量子ビットは2003年に初めて Rabi 振動が観測[5]されて以来、超伝導量子コンピュータ、超伝導量子アニーリングマシン、超伝導量子シミュレータ等の研究開発現場で広く使われている。現在、最も広く使われているトランズモン量子ビットと比べて構造は少し複雑であるが、同程度のコヒーレンス時間(数10  $\mu$ s)を持ち、非調和性が大きいため第二励起状態以上への励起が抑えられるといった利点もある。

磁束量子ビットの測定法として分散シフト法がある。この方法は2004年の理論提案以来、磁束量子ビットのみならずほぼ全ての超伝導量子ビット測定に用いられており、デファクトスタンダードとして定着している。一方、本研究では、独自のアプローチ(交差共鳴法)を取ることで分散シフト法よりも高性能な量子ビット測定法実現を目指す。

本研究で対象とする磁束量子ビット測定法(交差共鳴法)の従来法(分散シフト法)に対する優位性が実証されたあかつきには、磁束量子ビットのみならず全ての超伝導量子ビット測定法が、交差共鳴法に取って代わる可能性がある。その結果、あらゆる超伝導量子回路上で行われる量子力学実験や量子演算において、測定時間短縮・誤り率低減が期待できる。特に、短時間、低誤り率の量子ビット測定が重要である量子コンピュータのエラー訂正性能が劇的に向上し、一つの論理量子ビットを構成するための物理量子ビットの数(冗長性)を大幅に減少させられる。これは量子コンピュータ実現に向けた大きなステップとなる。さらに、本研究で対象とする量子測定器を用いた量子ビット測定法は汎用的であるため、量子力学の最重要問題の一つである測定(観測)に関する様々な概念、例えば、弱測定、測定と波束の収縮等について、理論・実験の両面から検証することができる。加えて、量子ビット - 量子測定器間のエンタングル状態は量子計算のリソースとしても重要であるため、量子ビット測定におけるエンタングル状態の生成過程およびその性質を詳細に調べることで、より幅広い量子情報処理全般における重要な知見が得られると期待できる。

## 3. 研究の方法

(1) 測定対象の超伝導量子ビットとして、通常の磁束量子ビットよりもコヒーレンス特性に優れたコンデンサ短絡型磁束量子ビット[6]を用いる。計画提案当初は磁束量子ビット - 磁束ドライブライン間および磁束量子ビット - 共振回路間の結合はいずれも磁氣的結合を想定していたが、コンデンサ短絡型磁束量子ビットの場合には、磁束量子ビット - 磁束ドライブライン間は磁氣的結合で磁束量子ビット - 共振回路間は電氣的結合を持つサンプルが構造上自然である。このような、異なる結合を持つサンプルで交差共鳴バイアス法による量子ビットの測定が可能であるかどうかについて、ジョセフソン接合を1つ含む磁束量子ビットとLC共振回路がインダクタを共有する回路の回路 Hamiltonian を導出することにより調べる。

(2) コンデンサ短絡型磁束量子ビットの設計・作製を行う。設計に際して、コンデンサ短絡型磁束量子ビットの Hamiltonian を電荷基底で記述し、数値対角化を行うことでエネルギー固有状態およびエネルギー固有値を計算するコードを作成する。本コードを用い、長いコヒーレンス時間と大きな非調和性を併せ持つための複数の回路パラメータセットを得る。続いて、得られた回路パラメータセットを実現する回路を描きサンプル作製を行う。

(3) 作製したサンプルを希釈冷凍機を用いて数10 mKに冷却し、交差共鳴法と従来手法である分散測定法との比較を行う。測定手順は次のとおりである。はじめにネットワークアナライザを用いた1光子分光測定により1/4波長共振器の共鳴周波数を得る。その後、ネットワークアナライザの周波数を1/4波長共振器の共鳴周波数に合わせつつ、信号発生器の周波数を変化させる2光子分光測定を行うことで量子ビットの遷移周波数を得る。続いて、量子ビットの遷移周波数に合わせたマイクロ波パルスの時間幅を変化させることで Rabi 振動測定を行い、パルスと呼ば

れる量子ビットの状態を反転させるマイクロ波パルスを決定するそれにより、量子ビットを $|0\rangle$ 状態および $|1\rangle$ 状態に準備することが出来る。

測定法の比較の際には  $1/4$  波長共振器と結合した Purcell フィルタの出力信号の複素振幅を測定する。その際、ヘテロダイン法により出力信号を  $50\text{ MHz}$  に下方変換し、 $500\text{ MS/s}$  のデジタルで A/D 変換することで複素振幅を得る。量子ビットの状態読み出しの際には  $1/4$  波長共振器の共鳴周波数のマイクロ波パルスを用いる。分散読み出しを行う際には Purcell フィルタに読み出し用のマイクロ波パルスを入力し、交差共鳴読み出しを行う場合には flux drive ラインに読み出し用のマイクロ波パルスを入力する。

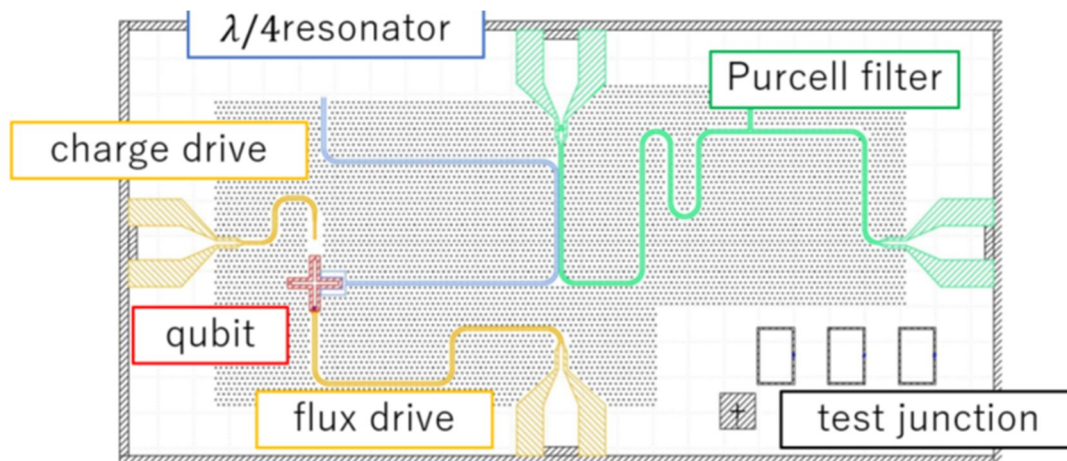


図 1 測定に用いた超伝導量子回路の設計図 . 電荷ドライブ用配線と磁束ドライブ用配線が十字電極を持つ容量短絡型磁束量子ビットと結合している . 磁束量子ビットと読み出し用の  $1/4$  波長共振器は容量的に結合しており ,  $1/4$  波長共振器は Purcell フィルタを介してマイクロ波の入出力配線と結合している .

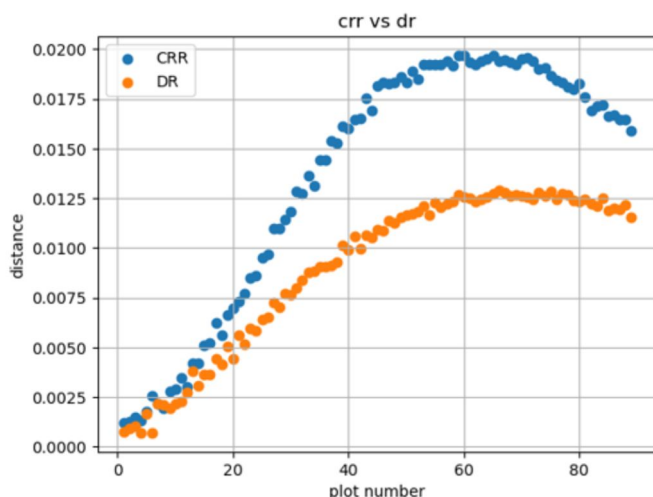


図 2 分散読み出し法(DR)と交差共鳴読み出し法(CRR)の比較。横軸は読み出し時間 , 縦軸は量子ビットが $|0\rangle$ 状態の時と $|1\rangle$ 状態の時とのマイクロ波信号の複素振幅の複素平面上での距離である .  $1\text{ plot number} = 5\text{ ns}$  である。

#### 4 . 研究成果

(1) 磁束量子ビット - 磁束ドライブライン間は磁氣的結合であり磁束量子ビット - 共振回路間は電氣的結合を持つサンプルで交差共鳴バイアス法による量子ビットの測定が可能であるかどうかについて、ジョセフソン接合を1つ含む磁束量子ビットとLC共振回路がインダクタを共有する回路の回路 Hamiltonian を導出することにより調べた。その結果、回路 Hamiltonian は量子 Rabi Hamiltonian で良く記述できることが分かった。一方で、磁束量子ビットの Hamiltonian および、固有状態や固有状態間の遷移行列要素について詳細に調べた結果、磁束演算子のみを考える場合には磁束量子ビットの最低二準位のみを考慮すれば良かったが、電荷演算子を考える際には磁束量子ビットの第二励起状態以上を無視できなくなることが分かった。本結果から得られた知見は、本提案手法を電場ドライブにする場合および磁束量子ビット - 共振回路間を電氣的結合にする場合を含めるように拡張するための不可欠な情報を与えてくれる。なお、本結果は Scientific Reports に採択された[7]。

(2) 超伝導量子回路の設計図を図1に示す。チップサイズは2.5 mm × 5.0 mmである。十字電極を持つ容量短絡型磁束量子ビットには電荷ドライブ用および磁束ドライブ用の配線が結合しているが、今回は磁束ドライブ用配線のみを用いる予定である。また、磁束量子ビットと読み出し用の1/4波長共振器は容量的に結合しており、1/4波長共振器はPurcellフィルタを介してマイクロ波の入出力配線と結合している。

(3) 量子ビットが $|0\rangle$ 状態のときの出力信号の複素振幅と $|1\rangle$ 状態のときの出力信号の複素振幅の複素平面上での距離を、読み出しパルスの時間幅の関数として測定した。結果を図2に示す。横軸の1 plot number は5 ns に相当する。ほぼすべての時間幅において交差共鳴読み出し法(CRR)の方が分散読み出し法(DR)よりも複素平面上での距離が大きくなった。この結果により、同じ測定時間において交差共鳴法の方が高い忠実度で $|0\rangle$ 状態と $|1\rangle$ 状態との読み出しを行える可能性があることを示した。

#### 参考文献

- [1] M. Brune et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 1800-1803 (1996).
- [2] A. Blais et al., Phys. Rev. A **69**, 062320 (2004).
- [3] S. Touzard et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 080502 (2019).
- [4] J. Ikonen et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 080503 (2019).
- [5] I. Chiorescu et al., Science **299**, 1869 (2003).
- [6] F. Yan et al., Nat. Commun. **7**, 12964 (2016).
- [7] F. Yoshihara et al., Scientific Reports **12**, 6764 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshihara F., Ashhab S., Fuse T., Bamba M., Semba K.	4. 巻 12
2. 論文標題 Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong-coupling regime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-10203-1	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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 F. Yoshihara
2. 発表標題 Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong-coupling regime
3. 学会等名 APS March meeting 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Yoshihara
2. 発表標題 Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong-coupling regime
3. 学会等名 ISNTT 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉原 文樹、アシュハブ サヘル、布施 智子、馬場 基彰、仙場 浩一
2. 発表標題 磁束量子ビット - LC共振器結合系の回路Hamiltonianにおけるゲージ変換
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉原 文樹
2. 発表標題 超伝導量子ビット実験研究に関する理論
3. 学会等名 第5回Q-LEAP量子AIセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉原 文樹、アシュハブ サヘル、布施 智子、馬場 基彰、仙場 浩一
2. 発表標題 深強結合領域における磁束量子ビット - LC共振器結合系の回路Hamiltonian
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉原 文樹、アシュハブ サヘル、布施 智子、仙場 浩一
2. 発表標題 交差共鳴磁束バイアスによる超伝導磁束量子ビット測定法の理論検討
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉原 文樹
2. 発表標題 量子情報技術への展開を目指した超伝導人工原子の研究
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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0件

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
---------	---------