

トランズモン量子ビットにおける 1 量子ビットゲートリークエラー評価

Single-qubit-gate leakage-error characterization in transmon qubits

富士通¹, 理研 RQC², 東大院工³

○阿部 徹^{1,2}, 村上 亮^{1,2}, 土肥 義康^{1,2}, 佐藤 信太郎^{1,2}, 田淵 豊², 中村 泰信^{2,3}

Fujitsu Limited¹, RIKEN RQC², The University of Tokyo³

°Toru Abe^{1,2}, Ryo Murakami^{1,2}, Yoshiyasu Doi^{1,2}, Shintaro Sato^{1,2}, Yutaka Tabuchi², Yasunobu Nakamura^{2,3}

E-mail: abe-toru@fujitsu.com

Early-FTQC 時代へ向けた STAR アーキテクチャ[1]で実用的な量子計算を実行するためには、量子コンピュータの物理エラー率は 10^{-4} 程度かそれ以下であることが望ましい。この低いエラー率を達成するには、計算基底内で生じるパウリエラーのみならず、計算基底外への遷移であるリークエラーの影響も無視できない[2]。そこで、本研究では超伝導トランズモン量子ビットを用いて 1 量子ビットゲートのリークエラー評価を行った。

実験では、基底状態 $|g\rangle$ から第一励起状態 $|e\rangle$ への励起エネルギー8.79 GHz、非調和度-287 MHz のトランズモン量子ビットを使用した。測定は希釈冷凍機内 15 mK の温度下で行った。

図 1 は Leakage Randomized Benchmarking (LRB) [2]によるリークエラー評価の結果を示している。横軸は量子回路中に含まれるランダムなクリフォードゲートの数であり、縦軸は第二励起状態 $|f\rangle$ の占有率である。各クリフォードゲートは仮想 Z ゲートと X/2 ゲートへ分解される[3]。X/2 は全幅 30 ns (半値全幅 10 ns) のガウシアンパルスに位相エラーを抑制するための DRAG 補正[4]を加えて実装している。計算基底 ($|g\rangle$, $|e\rangle$) と非計算基底 ($|f\rangle$) を用いた 3 準位レート方程式でのフィッティングにより、1 クリフォードゲートあたりのリークエラー率として $(1.5 \pm 0.1) \times 10^{-4}$ が得られた。これは目標値 10^{-4} を 5×10^{-5} 程度上回っており、さらなる抑制が必要である。一方、全体のエラー率は 3.0×10^{-3} とさらに一桁大きく、そのおよそ 8 割を占めるデコヒーレンスエラーの抑制が目標達成には不可欠である。

図 2 に $|e\rangle$ 状態を初期状態とした量子ビット緩和測定の結果を示す。横軸は時間(対数スケール)、縦軸は $|f\rangle$ 状態の占有率である。はじめは熱励起によって $|f\rangle$ 状態の割合が増加し、その後はエネルギー緩和に伴い平衡状態に向かって減少する。3 準位レート方程式によるフィッティングの結果、熱励起による $|e\rangle$ から $|f\rangle$ への遷移レートとして $(1.01 \pm 0.08) \times 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$ が得られた。ここで、X/2 ゲート時間 30 ns とクリフォードゲート中に含まれる平均 X/2 ゲート数 2.21 [3]を用いると、1 クリフォードゲートあたりのリークエラー率として $(3.3 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ が得られる。このことから、熱励起に起因するリークエラーは比較的小さく、量子ゲート制御によるものが支配的であると示唆される。一方、2 量子ビットゲートではゲート時間が 100 ns 以上と長くなるため、熱励起による影響も無視できないことが示唆される。

今後は、測定処理を効率化しチップ全体の傾向を調べるとともに、2 量子ビットゲートのリークエラーを評価できるよう LRB を拡張する予定である。

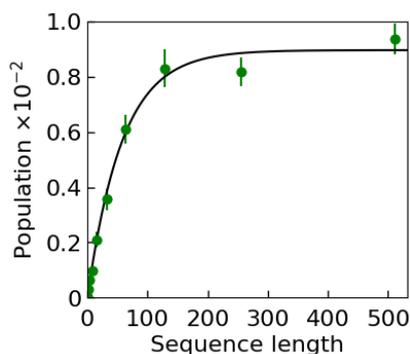


図 1. LRB の結果。横軸はクリフォードゲート数、縦軸は $|f\rangle$ の占有率。

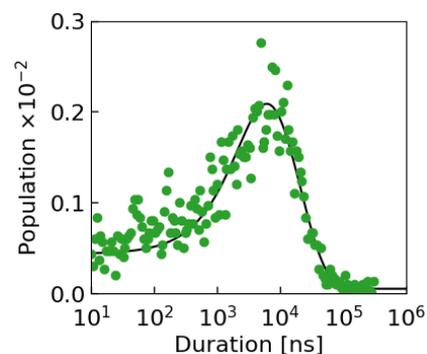


図 2. 緩和測定の結果。横軸は状態準備から測定までの時間、縦軸は $|f\rangle$ の占有率。

[1] Y. Akahoshi *et al.*, PRX Quantum **5**, 010337 (2024)

[2] Z. Chen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 020501 (2016)

[3] Z. Li *et al.*, npj Quantum Inf **9**, 111 (2023)

[4] E. Lucero *et al.*, Phys. Rev. A **82**, 042339 (2010)