

SFQ アニールに向けた単一のスピン素子の特性評価

Characteristic evaluation of a spin element for SFQ Annealer

名大院工 ○東正志、長谷川大輝、竹下雄登、加藤健人、藤澤日向、李峰、
田中雅光、山下太郎、藤巻朗

Nagoya Univ, ○Masayuki Higashi, Daiki Hasegawa, Yuto Takeshita, Kento Kato,
Hinata Fujisawa, Feng Li, Masamitsu Tanaka, Taro Yamashita, and Akira Fujimaki

E-mail: mhigashi@super.nuee.nagoya-u.ac.jp

背景

組合せ最適化問題を解く計算技術として現在、半導体 CMOS アニールや量子アニール研究が行われている。これらはイジングモデルと呼ばれる統計力学モデルを用いて最適化問題を解く。イジングモデルは2つの状態を持つスピンから構成され、隣接するスピンは相互作用および強制力によって状態が変化し、コスト関数に対応させた総エネルギーが最小となるスピンの状態を探索することで最適解を求める。

我々は π 接合を用いた SQUID による、4.2 K で動作する SFQ アニール[1]の実現を目指している。SFQ アニールは、CMOS アニールのような疑似乱数を用いないこと、量子アニールのようにミリケルビンの動作環境を必要としないこと、を利点とする。 π 接合を含んだ SQUID は外部磁場なしに2つの安定状態を持ち、イジングモデルのスピン素子として用いる。2つの状態間のポテンシャル障壁の高さ (ΔE) は、SQUID のループインダクタンス L と接合の臨界電流値 I_c の積である LI_c 積を調整することで制御でき[2]、接合を dc-SQUID とすれば外部磁場により ΔE を変調することができる。これまでに、温度を上げる代わりに ΔE を下げることで、4.2 K における熱雑音でスピン素子を反転できることを示した[3]。本稿では、SFQ アニールの構成単位となる単一のスピン素子の特性解明を目的とし、実際に素子を作製し、特性を評価した結果についてについて報告する。

実験

Fig. 1 に、今回作製した単一のスピン素子の写真、Fig. 2 に素子パラメータの設計値を示す。Fig. 2 のように、スピン素子の内部状態は SQUID の周回電流の向きに対応し、反時計回りを+1、時計回りを-1とする。また、熱雑音によって SQUID の内部状態が反転することをフリップと呼ぶ。

今回作製した素子は LI_c 積が大きく、 ΔE を熱雑音のエネルギー程度まで下げることができないため、疑似雑音源を用いて特性評価を行った。ここで、疑似雑音は白色ガウス雑音を任意波形生成器で生成した。Fig.3 に制御電流 I_{ctl} とフリップ確率の関係を示す。Fig.3 に示したように、制御電流 I_{ctl} を増加していくとフリップ確率は大きくなり、最終

的に 50% に飽和した。また、エラー関数によるフィッティングの結果、エラー関数のグレーゾーン幅はノイズ電流 I_{noise} の二乗に比例することから、フリップ確率は ΔE と雑音のエネルギーとの比によって決定されることが分かった。よって、 ΔE を制御することで熱雑音によるフリップが可能であることが示唆される。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP18H05211, JP18H01498, JP19H05615) 及び JST 未来社会創造事業 (JPMJMI18E1)、CREST (JPMJCR20C5) の支援を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] 東ほか、応用物理学会春季学術講演会, 2020 年 3 月.
- [2] T. Kamiya, M. Tanaka, K. Sano, and A. Fujimaki, IEICE Trans. Electron., vol. E101-C, pp. 385-390, 2018.
- [3] M. Higashi et al, ASC2020 Virtual conference.

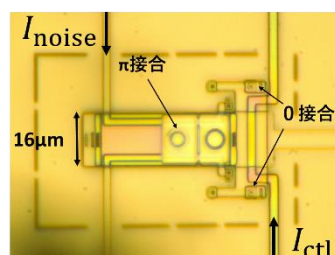


Fig. 1 Photograph of a fabricated spin element.

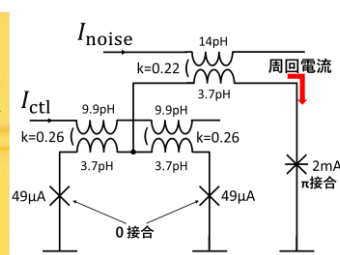


Fig. 2 The parameter of a spin element.

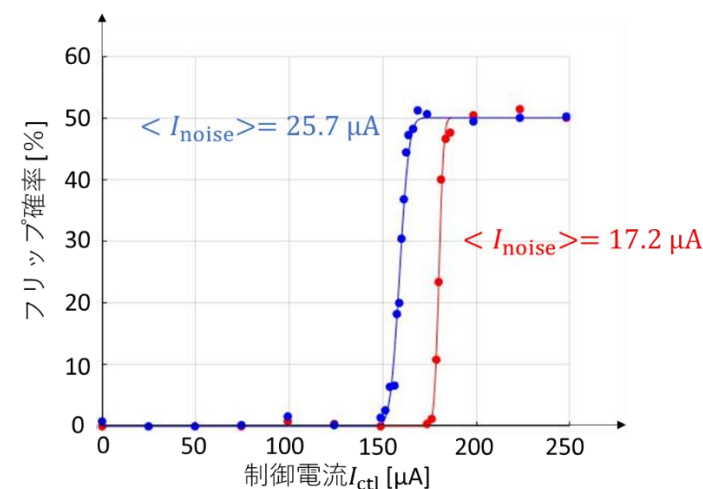


Fig. 3 Flipping probability.