

SFQ アニーラにおける隣接するスピン間の相互作用の影響

Effect of interaction between adjacent spins for SFQ annealer

名大院工 ○東正志、長谷川大輝、竹下雄登、Li Feng、
田中雅光、山下太郎、藤巻朗

Nagoya Univ, ○Masayuki Higashi, Daiki Hasegawa, Yuto Takeshita,
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 アニーリングや量子アニーリングの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、最終的に総エネルギーが最小となるスピンの状態で安定する。

我々は π 接合を用いた SQUID による、4.2 K で動作する SFQ アニーラ[1]の実現を目指している。量子アニーラと同様、疑似乱数ではなく自然の擾乱を利用するが、ミリケルビンの動作環境を必要とせず、冷却のためのコストが圧倒的に小さい利点を持つ。 π 接合を含んだ SQUID は外部磁場なしに2つの安定状態を持つことができる。また、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または接合の臨界電流値 I_c を調整することで制御できる [2]。これまでに、SFQ アニーラを構成するスピン回路について、回路パラメータを調整することにより、熱の擾乱で状態を反転できることを示した。本稿では、隣接するスピン回路の相互作用によって、スピン回路の状態が変化する確率を変化させられるかを明らかにすることを目的とし、数値計算による検討結果を報告する。

数値解析

Fig. 1 に、SFQ アニーラの構成単位となる単一のスピン回路を示す。Fig. 1 のように、スピン回路の内部状態は SQUID の周回電流 I_{spin} の向きに対応し、反時計回りを+1、時計回りを-1とする。隣接する SQUID とは、可変カップラーを使用して相互に結合する。組合せ最適化問題をマップするように結合されている場合、総エネルギーを最小化することで最適解が求められる。dc-SQUID に結合させた制御ラインに電流を流すことにより ΔE を制御することが、アニーリング温度を変化させることに対応する。

今回行った数値解析では Fig. 1 に示す単一のスピン回路を用い、隣接するスピン回路との結合ライン（結合ライン）に直接電流を流すことによりスピン間の相互作用を模した。制御ラインに電流

を流すことにより、dc-SQUID に $0.5\Phi_0$ 相当の磁場を印加し、 ΔE を最小とした。その上で、結合ラインに電流を流し、スピン回路の状態が-1となる確率を求めた (Fig. 2)。なお、試行回数は 10000 回とし、接合の抵抗で熱雑音が発生していることを仮定している。Fig. 1 に示すスピン回路の周回電流の値はおよそ $18 \mu\text{A}$ であるため、実際に結合ラインに流れる電流は数 μA となる。この値はスピン回路の状態を変化させることが可能であることを示しており、スピン結合回路の実現可能性を示している。

講演では、 ΔE の大きさおよび素子パラメータによって相互作用が及ぼす影響の違いについて議論する。

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) 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.

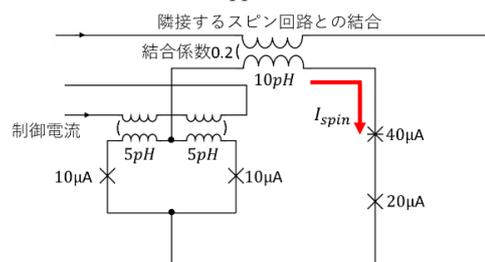


Fig. 1 A basic element of SFQ annealer

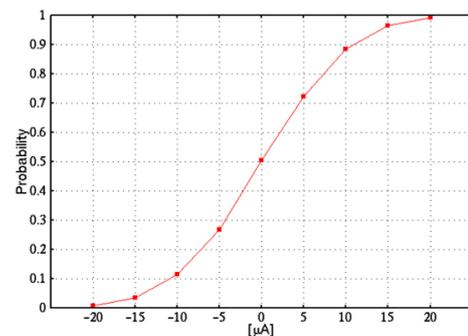


Fig. 2 Probability that spin state is -1.