

## 4.2 K で動作する SFQ アニーラに向けた $\pi$ 接合を用いた SQUID の解析

### Analysis of $\pi$ -Junction-Based SQUIDS for SFQ Annealer Operating at 4.2 K

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>JST さきがけ <sup>○</sup>東正志<sup>1</sup>、長谷川大輝<sup>1</sup>、竹下雄登<sup>1</sup>、Li Feng<sup>1</sup>、  
田中雅光<sup>1</sup>、山下太郎<sup>1,2</sup>、藤巻朗<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nagoya Univ, <sup>2</sup>JST-PRESTO <sup>○</sup>Masayuki Higashi<sup>1</sup>, Daiki Hasegawa<sup>1</sup>, Yuto Takeshita<sup>1</sup>,  
Feng Li<sup>1</sup>, Masamitsu Tanaka<sup>1</sup>, Taro Yamashita<sup>1,2</sup>, and Akira Fujimaki<sup>1</sup>

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。イジングモデルは二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  $\pi$  接合を用いた SQUID による、4.2 K で動作する SFQ アニーラの実現を目指している。 $\pi$  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 ( $\Delta E$ ) 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 [1]。本稿では、SFQ アニーラ向けに検討した、 $\pi$  接合を用いた SQUID のパラメータについて検討したので報告する。

#### 数値解析

図 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。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。 $\pi$  接合を含む SQUID の片方の接合を dc-SQUID で置き換え、dc-SQUID に結合させた制御ラインに電流を流すことにより  $\Delta E$  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。アニーリングに用いるには、4.2 K の熱雑音に対して、制御電流を加えないときに十分高い  $\Delta E$  をもち、かつ、制御電流を加えると  $\Delta E$  を熱雑音程度に変調できることが要件となる。これらを満たすため、SQUID は非対称とし、スイッチしない  $\pi$  接合の  $I_c$  を小さくすることでスイッチング時の  $\theta_3$  の変化量を抑えるよう、回路パラメータを設計した。

図 1 のスピン回路のポテンシャルエネルギーを求めた結果を図 2 に示す。ポテンシャルエネルギーはジョセフソンエネルギー  $E_J$  で規格化している。 $\Delta E$  は dc-SQUID に制御ラインを通じて外部磁場を印加しなかった場合  $58.5 k_B T$ 、外部磁場  $0.3 \Phi_0$  を印加

した場合  $2.7 k_B T$  となった ( $k_B$  は Boltzmann 定数、 $T$  は温度)。これらのパラメータにより、熱雑音による自発的な反転を利用したアニーリング操作が可能であると期待される。

講演では、上記のパラメータをもとに設計した SFQ アニーラの動作の詳細について議論する。

#### 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] T. Kamiya, M. Tanaka, K. Sano, and A. Fujimaki, IEICE Trans. Electron., vol. E101-C, pp. 385-390, 2018.

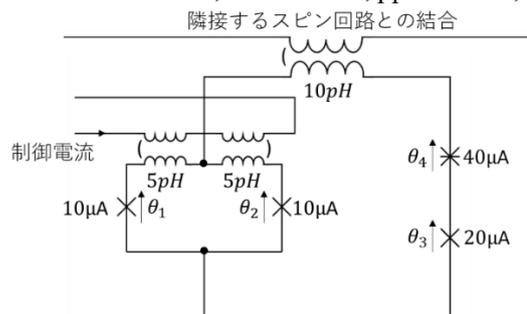


Fig. 1 A basic element of SFQ Annealer

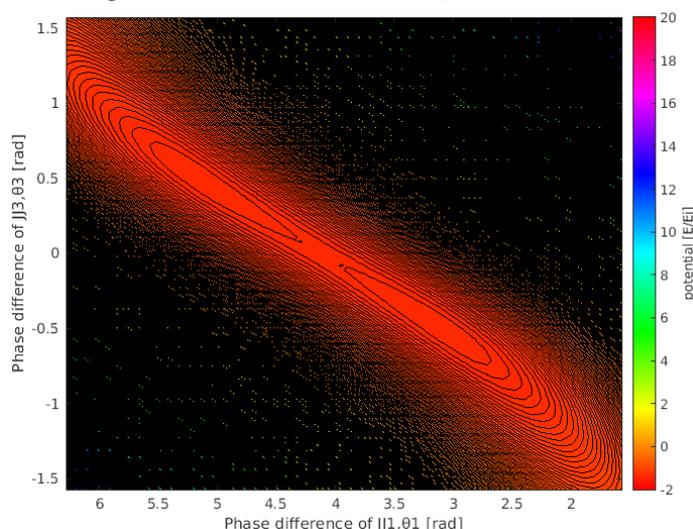


Fig. 2 Potential energy of the spin circuit shown in Fig. 1