

超伝導細線三端子素子のパルス電流応答シミュレーション (2)

Simulation of pulse-current responses of a superconducting-nanowire three-terminal device (2)

東理大¹, 産総研², 横国大³ ◯安川 直輝^{1,2}, 山梨 裕希³, 吉川 信行³, 西尾 太一郎¹, 馬渡 康徳²

Tokyo Univ. of Science¹, AIST², Yokohama National Univ.³,

◯Naoki Yasukawa^{1,2}, Yuki Yamanashi³, Nobuyuki Yoshikawa³, Taichiro Nishio¹, and Yasunori Mawatari²

E-mail: 1224703@ed.tus.ac.jp

超高速かつ超低損失な超伝導単一磁束量子 (SFQ) 回路と高集積な半導体 (CMOS) 回路を組み合わせる、超高性能ハイブリッドシステムの実現が期待されている。その SFQ 回路と CMOS 回路のインターフェイスとして、超伝導細線の超伝導-常伝導転移を利用する三端子素子である nTron[1]が MIT の研究グループにより発明された。我々は、その三端子動作の基礎的な理解を目的として、直流応答シミュレーション[2]やパルス信号をゲートに入力したときのパルス電流三端子動作に関するシミュレーション[3,4]を行い、報告してきた。パルス電流をゲートからチャンネルへ入力する場合、チャンネルでの常伝導転移発生時に、チャンネルからゲートへ電流が逆流することが明らかになった。これは、ゲートへ信号を送る SFQ 回路等のデバイスの正常な動作に悪影響を与える可能性がある。そこで今回は、ゲートへの電流逆流防止を目的とし、ジョセフソン接合の等価回路を回路に組み込んだシミュレーションを行ったので報告する。

シミュレーションの基礎となる支配方程式には、これまでと同様に時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式と熱拡散方程式を用いて、有限要素法により数値解析シミュレーションを行った[2]。超伝導状態にある三端子素子にチャンネルバイアス電流 (I_{bias}) を印加し、パルス電圧 (V_0) を入力した時のチャンネル電圧 (V_{ch}) 及びゲート電流 (I_g) の応答を調べた (Fig. 1(A)参照)。 V_0 は SFQ 回路からのパルス信号を模した矩形波状のパルス電圧である。電圧源と三端子素子の間のジョセフソン接合 (JJ) (Fig. 1(A)の赤枠部分) の有無による比較を行った。

Fig. 1(B) は、 $I_{\text{bias}} = 76 \mu\text{A}$ としてゲートに量子化磁束ひとつ分程度のパルス電圧 (V_0 の波高 0.5 mV, 波幅 ~5 ps) を入力した時の V_{ch} と I_g の数値計算結果である。接合の有無にかかわらず、時刻 $t = 0 \text{ ps}$ でパルス電圧が入力されたのち、 $t = 18 \text{ ps}$ で 6 mV 程度のチャンネル電圧が生じる。そこから、30 ps 程度かけて V_{ch} が減少し、最終的にゼロ電圧状態へ戻る。 I_g に関しては、接合がないときパルス電圧入力以降、 $I_g = -6 \mu\text{A}$ を超える逆流が起こる。一方、接合があるとき、 $I_g = -3 \mu\text{A}$ 程度に抑えられる。ジョセフソン接合によりゲートへの電流逆流が抑制されることを確認できた。

本研究は、JSPS 科研費 JP20K05314 及び JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2151 の支援を受けたものです。

[1] A. N. McCaughan and K. K. Berggren, *Nano Lett.* **14**, 5748 (2014).

[2] N. Yasukawa et al., *Supercond. Sci. Technol.* **37**, 065013 (2024).

[3] 安川他、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 18p-B5-5 (2024).

[4] N. Yasukawa et al., The 37th International Symposium on Superconductivity (ISS 2024) ED5-5.

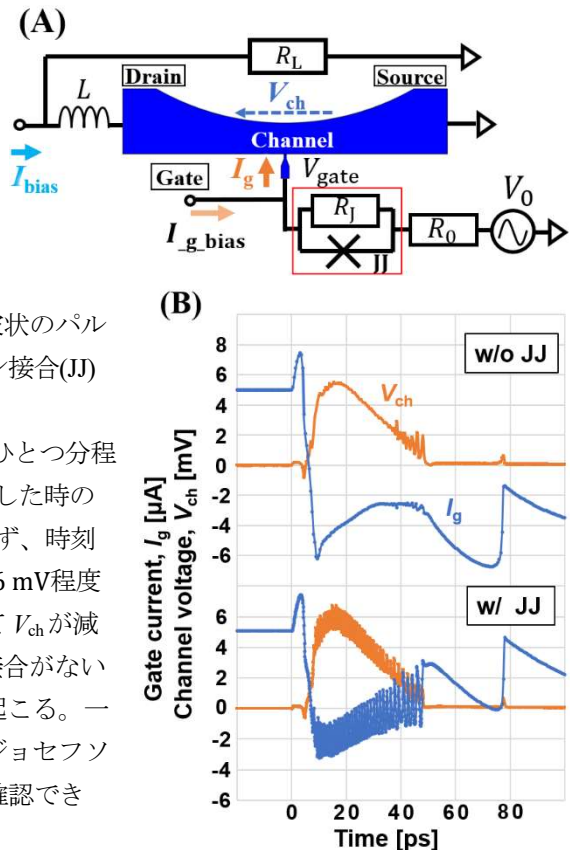


Fig. 1. (A) Circuit schematic for nTron and Josephson Junction (B) Channel voltage and gate current characteristics of the nTron.