

C-8-7

消費電力数 nW の単一磁束量子回路の動作実証

Nano-watt operation of single-flux-quantum circuits

北山敦史*¹
Atsushi Kitayama伊藤将人*¹
Masato Ito額綱智仁*¹
Tomohito Kouketsu田中雅光*¹
Masamitsu Tanaka藤巻朝*¹
Akira Fujimaki名古屋大学*¹

Nagoya University

1. はじめに

ここ数十年で目覚ましい発展を遂げてきた CMOS 回路であるが、近い将来、配線における遅延や発熱等の問題に直面すると言われている。これらの問題を抜本的に解決可能な回路として単一磁束量子(SFQ)回路がある。SFQ 回路は元来、高速動作、低消費電力という特徴を持つ。加えて、光速で信号伝送することが可能な受動伝送線路(PTL:Passive Transmission Line)が利用でき、先ほど述べた配線における遅延や発熱の問題も解決できる。しかし、動作には冷凍機が必要となる。SFQ 回路はこの冷凍機の消費電力を含めて考えた場合、半導体に対して絶対的に優位であると言えない。このために近年 SFQ 回路の更なる低消費電力化が求められている。

SFQ 回路における消費電力は、バイアス抵抗 R_b で消費される電力(静的消費電力)と、(ジョセフソン接合) JJ 自身の抵抗ならびにシャント抵抗 R_s で発生する電力(動的消費電力)に分けられる。現在の SFQ 回路では、電力の大半は R_b で消費されていることから、静的消費電力を小さくすることが求められる。静的消費電力を低減する方法としては、LR ロード[1]、RQL[2]、eSFQ[3]等が挙げられる。一方、動的消費電力を下げるのが、半導体集積回路に対し、絶対的優位性を確保するには必要となり SFQ 回路全体の消費電力としては数 nW 程度が求められる。そこで我々は、消費電力数 nW を目指し電源電圧 V_b を低減化した SFQ 回路の研究を行った。これは、静的、動的両方の消費電力を下げられるほか、これまでの SFQ 回路の資産をそのまま利用できる。

2. 動的消費電力の低減化

SFQ 回路は本来、回路を駆動するために供給しているバイアス電流 I_b をできるだけ変動しないように電源は電流源に近い形で電流を供給している。ここで V_b を小さくすると、電源は電流源と見なせなくなり、JJ がスイッチした際、 I_b が急峻に減少するといった現象が起こる。この I_b の現象に関して V_b 依存性を図 1 に示す。図 1 のように V_b を低減するに従い、JJ がスイッチした際のバイアス電流の減少量が大きくなる。このとき JJ のスイッチ時間が長くなる。シャント抵抗 R_s において消費される動的消費電力は、 $P_d = V^2/R_s$ と表わされる。ここで V は JJ において $V = d\phi/dt$ のにより発生する電圧である。ここで ϕ は JJ 両端の位相差である。 V_b を小さくすると JJ のスイッチ時間が長くなるため、スイッチしたときに発生する電圧 V は小さくなる。このとき動的消費電力は小さくなる。この動的消費電力の V_b の依存性を図 2 に示す。

本研究では、このような動的消費電力の低減化を示すために V_b を低減化したシフトレジスタを作製した。この回

路の測定の結果、1 接合が 1 回スイッチングするのに必要なエネルギーは $1.7 \times 10^{-19} \text{J}$ となった。この値は、ジョセフソン接合の結合エネルギーのわずか 1.5 倍であり、シャント抵抗で消費される動的消費エネルギーを低減化していることを示すことができた。

エネルギー遅延積の観点からは、本研究で試作したシフトレジスタの従来 SFQ 回路に比べて 13 倍向上した。この値は、半導体に比べて 5 桁優れていることから、冷凍機の消費電力を考慮しても半導体に対して優位であると言える。本研究において試作したシフトレジスタは単純に V_b を下げるといった手法によって行ったものであり、最適化によって更なる向上も見込める。

謝辞

本研究は、科研費(基盤 S 22226009)の助成を受けたものである。本研究に用いた回路は ISTEK の STP2 プロセスを用いて作製した。また、本研究に用いた回路の作成には、産業技術総合研究所が一部寄与している。

参考文献:

- [1] Y. Yanamashi, T. Nishigai, and N. Yoshikawa, "Study of LR-Loading Technique for Low-Power Single Flux Quantum circuits," IEEE Trans, Appl, Supercond, 17, pp,150-153, 2007
- [2] Quentin P. Herr, Anna Y. Herr, Oliver T. Oberg, and Alexander G. Ioannidis, "Ultra-low-power superconductor logic," Journal of applied physics, 109, 103903, 2011
- [3] Oleg A. Mukhanov, Senior Member, "Energy-Efficient Single Flux Quantum Technology", IEEE Trans, Appl, Supercond., 21, pp760-769, 2011

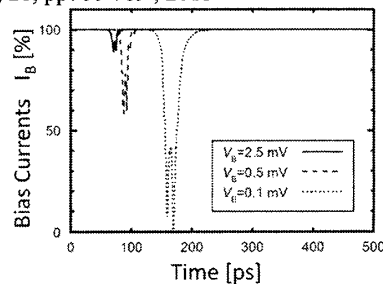
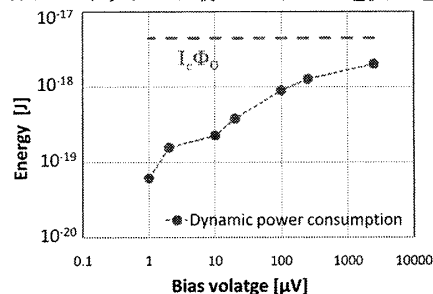


図 1: JJ がスイッチした際のバイアス電流の過渡現象

図 2: 動的消費電力の V_b 依存性