

# 低電圧 RSFQ ALU の動作実証

## Demonstration of low-bias-voltage RSFQ ALU

幸村 勇斗  
Yuto Komura北山 敦史  
Atsushi Kitayama岡田 将和  
Masakazu Okada田中 雅光  
Masamitsu Tanaka藤巻 朗  
Akira Fujimaki名古屋大学  
Nagoya University

### 1. はじめに

単一磁束量子回路(RSFQ 回路)は、高速動作性及び低消費電力性を有した回路である。冷凍機を含めた RSFQ 回路の消費電力においても半導体に対して十分な優位性を示すため、近年更なる低消費電力化が進められている。

RSFQ 回路の消費電力を低減するには、バイアス電圧  $V_b$ 、並びに接合の臨界電流値  $I_c$  を低減する方法がある。これまで  $V_b$ ,  $I_c$  をそれぞれ 1/125, 1/4 に低減することで、従来の消費電力に比べ 1/500 に低減した RSFQ 回路の動作実証がなされている[1]。しかしながら、これまでの低消費電力 RSFQ 回路はシフトレジスタ等の単純な回路の動作実証に留まっており、今後更に大規模かつ複雑な回路での動作実証が求められる。そこで、本研究では、シフトレジスタよりも接合数の多くより複雑な回路である ALU に関して低消費電力化を行い、動作実証を行った。

### 2. 低電圧 ALU の評価

本研究で作製した低電圧 ALU のパラメータを表 1、チップ写真を図 1 に示す。 $V_b$  は従来 1/10 である 250  $\mu$ V とし、消費電力を従来の 1/10 に低減した低電圧 ALU を作製した。また、 $I_c$  の低減は、回路の歩留まりの低下を考慮行っていない。今回は臨界電流密度  $J_c$  が 10 kA/cm<sup>2</sup> であるアドバンストプロセス(ADP)を用いて作製した。

低電圧 RSFQ 回路においては、バイアス電流量が設計値からずれた場合に、遅延時間の変化量が従来よりも大きくなる。このため複雑な回路である ALU ではよりタイミング設計が難しくなり、タイミングマージンが狭くなることが予想される。これを解決するため、セルの最適化を行い、本研究で用いた回路パラメータに適したタイミング設計を行った。更に、十分に余裕を持ったタイミング設計を行うため、設計周波数は 10 GHz と 20 GHz とした。また、今回設計した ALU は、加算(ADD), 減算(SUB), XOR, AND の 4 つの演算についてビットシリアル処理を行うものとした。回路全体の接合数は 2000 程度となった。これらの低電圧 ALU の各演算のバイアスマージンの周波数特性を評価する。

オンチップによる高速試験の結果、ALU A, B 共に全ての演算で動作を確認することが出来た。ALU B の各演算におけるバイアスマージンの周波数特性を図 2 に示す。ALU B では、最高動作周波数 28 GHz での動作実証に成功した。また、ALU B は、電流量が 82.5 mA、電力としては 28  $\mu$ W であった。この回路において、デジタル回路の性能の指標となる電力遅延積 (Power Delay Product) を求めると、 $1 \times 10^{-15}$  W $\cdot$ s となった。本研究で動作実証を行った低電圧 ALU は、従来の ADP の回路と比べると PDP が 1/3.6、

また、従来の標準プロセスを用いた回路と比較すると 1/7.1 の性能向上に成功した。

### 謝辞

本研究は、JST-ALCA 及び科研費(基盤 S 22226009)の支援を受けたものである。本研究に用いた回路は ISTE の ADP2 プロセスを用いて試作した。また、回路の作製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] A. Kitayama, M. Ito, T. Kouketsu, M. Tanaka, and A. Fujimaki: "Nano-watt operation of single-flux-quantum circuits," IEICE Society Conference. Sapporo. Japan. Sep. 2011.
- [2] S. Yorozu et al. "A single flux quantum standard logic cell library," *Physica C: Superconductivity*, vol. 378-381, part 2, pp.1471-1474

表1. ALUのバイアス電圧、接合の最小の臨界電流値、消費電力、設計周波数. ただし、※はCONNECTセル[2]であり、消費電力はCONNECTセルとの比を示す

ALU	$V_b$ ( $\mu$ V)	Min. $I_c$ ( $\mu$ A)	消費電力	設計周波数
※	2500	100	-	-
A	250	100	1/10	10 GHz
B	250	100	1/10	20 GHz



図 1. ALU B のチップ写真

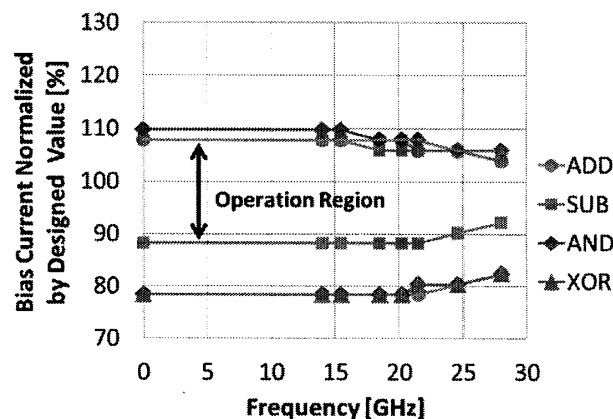


図 2. ALU B のバイアスマージンの周波数特性