

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2009

課題番号：18080006

研究課題名（和文）

単一磁束量子局在電磁波集積回路

研究課題名（英文）

Single-Flux-Quantum Integrated Circuits based on Localized Electromagnetic Waves

研究代表者

吉川 信行 (YOSHIKAWA NOBUYUKI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70202398

研究分野：電子工学、集積回路工学、超伝導エレクトロニクス

キーワード：局在電磁波、単一磁束量子、SFQ、単一磁束量子論理回路、

サブテラヘルツ集積回路、超伝導回路、低消費電力、信号処理回路

### 1. 研究計画の概要

ピコ秒幅の微小電圧パルスを情報担体とする単一磁束量子回路は、スイッチングに要するエネルギーが極めて小さく、動作速度も高速であり、半導体回路を凌駕する優れた性能を持つ。一方、超伝導体導波路において局在電磁波パルスは形を変えずに弾道的に伝播し、単一磁束量子回路を柔軟かつ高スループットで配線することが可能である。この局在電磁波の高速信号伝送特性を利用することにより、単一磁束量子論理回路の性能を飛躍的に向上させることができる。

本特定研究領域は、将来のサブテラヘルツ集積回路分野の確立に向け、新しい局在電磁波配線技術を前面に据えた単一磁束量子集積回路の研究を、デバイス、設計技術から応用まで総合的に推進するものである。具体的には、単一磁束量子局在電磁波集積回路の動作スピードと集積密度を高めるための基盤となるプロセス技術、ならびに局在電磁波導波路を利用した回路設計技術を確立し、それらの高速信号処理回路応用への展開を図る。

研究組織は、「局在電磁波集積回路プロセスの研究」班と「局在電磁波集積回路設計技術・システム研究」班の2つのグループで構成し、以下のテーマについて研究を行った。

#### (1) 局在電磁波集積回路プロセスの研究

- ①「単一磁束量子局在電磁波集積回路プロセスに関する研究」代表：藤巻朗（名古屋大学）
- ②「二硼化マグネシウム超伝導接合技術の確立」代表：内藤方夫（東京農工大学）
- ③「単一磁束量子による高スループット微細超伝導配線」代表：明連広昭（埼玉大学）

#### (2) 局在電磁波集積回路設計技術・システム

### 研究

- ①「局在電磁波による高速信号伝送を利用した単一磁束量子高速フーリエ変換回路の研究」代表：中島康治（東北大学）
- ②「局在電磁波配線を利用した単一磁束量子論理ゲートの研究と高速信号処理回路への応用」代表：吉川信行（横浜国立大学）
- ③「局在電磁波配線を用いた単一磁束量子論理回路の設計および設計支援に関する研究」代表：高木一義（名古屋大学）
- ④「超伝導多層導波路の高密度三次元設計と評価」代表：水柿義直（電気通信大学）

### 2. 研究の進捗状況

これまでの研究成果は以下の通りである。

#### (1) 局在電磁波集積回路プロセスの研究

- ① NbN/AlN/NbN<sub>x</sub>/NbN 構造によって、4K においてセルフオーバーダンブジョセフソン接合を実現した。各種条件を最適化することにより、品質パラメータ  $L_c R_n$  積として Nb 接合と同等の 0.8mV を得た。
- ② サンドイッチ型の MgB<sub>2</sub> 接合作製に向けて、MgB<sub>2</sub> 電極/バリア材料/MgB<sub>2</sub> 電極の三層積層に取り組んだ。MgB<sub>2</sub>/a-B/MgB<sub>2</sub> 接合において、30GHz マイクロ波照射により4次シャピロステップを観測し、接合の高周波応答の可能性を示した。
- ③ 微細な局在電磁波配線の実現を目的として、電子ビーム描画による高誘電体薄膜を用いたサブミクロン線幅の超伝導線路の作製を行い、0.9μm 幅の局在電磁波配線を完成した。損失評価を行い、細線化による損失増大が無いことを示した。

## (2) 局在電磁波集積回路設計技術・システム研究

① 単一磁束量子ゲートと局在電磁波配線を直接接続するための設計方法論を確立した。ゲート直結型の局在電磁波配線を用いて 2×2 スイッチを試作し、提案手法により接合数、消費電力、遅延時間などの特性が向上することを示した。

② 多層超伝導 LSI 構造において、超伝導ストリップラインの接地構造がインダクタンスに与える影響を理論と実験により明らかにした。以上により、超伝導多層導波路のインダクタンスを正確に決定するための知見を得た。

③ クロック信号の配信方式、クロック同期式順序回路の合成のための新たな方法を提案した。また、クロックスケジューリングを実現する、レイアウトを考慮したクロック木構成法を開発した。

④ ビット直列、並列両方式において数種類の加算器、乗算器を設計し、その性能評価を行った。4-bit 並列加算器の 20GHz での高速動作実証に成功した。更にビット直列型の FFT 用 2 点バタフライ演算器を試作し、16GHz での高速動作実証に成功した。

## 3. 現在までの達成度

② おおむね順調に進んでいる。

(理由)

プロセス面では、NbN や MgB2 などの新材料を用いたジョセフソン接合の作製に成功し、局在電磁波回路の高速化に向けた新たな展開を可能とした。サブミクロン配線については、単一磁束量子回路との統合が今後の課題となる。

設計面では、領域において局在電磁波回路を共同で開発するための回路仕様と設計環境の統一を行い、セルライブラリを共同開発するための環境を整えた。これにより、日本における単一磁束量子回路の設計技術を飛躍的に向上させることができた。現在、超伝導集積回路プロセスの移転により、半年間ファウンドリーが停止中であり、FFT プロセッサ等の回路試作の遅れが見られた。しかしながら、本領域の研究グループが一丸となり、回路評価を通してプロセスの改善に取り組んだ。以上により、プロセスの早期立ち上げに向けて大きな貢献を行なった。

## 4. 今後の研究の推進方策

領域終了時にインパクトのある研究成果を社会に発信するために、領域として次の共同研究目標を定めた。

(1) 高速動作 NbN 接合を用いたサブミクロン局在電磁波伝送線路の高速伝送実証

従来の Nb 接合に対して高速動作が可能な NbN 接合を用い、局在電磁波の 100Gbps を超

える信号伝送を実証する。

(2) 次世代プロセス用いた FFT プロセッサの高速動作実証

次世代 Nb プロセスを用いて、FFT プロセッサの設計、試作を行い、FFT プロセッサの 50 GHz を超える動作実証を行う。

(3) MgB2 接合の作製と回路応用の検討

MgB2 接合の特性評価を行い、SFQ 回路への応用の可能性を示す。

## 5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 45 件)

(1) R. Kanada, Y. Nagai, H. Akaike, A. Fujimaki, "Self-shunted NbN junctions with NbN<sub>x</sub>/AlN/NbN<sub>x</sub> multilayered barriers for 4 K operation," IEEE Trans. Appl. Supercond., *in press*. 査読有

(2) T. Ishibashi, T. Kawata, A. Tsukada, H. Shibata, M. Naito, K. Sato, "Magneto-optical observation of magnetic flux in patterned MgB2 films," Physica C Vol. 468, p. 1313-1315, 2008. 査読有

(3) T. Onomi, T. Kondo, and K. Nakajima, "High-speed single flux-quantum up/down counter for neural computation using stochastic logic", Journal of Physics: Conference Series, vol.97, p.012187, March 2008. 査読有

(4) Y. Mizugaki, R. Kashiwa, M. Moriya, K. Usami, and T. Kobayashi, "Grounding positions of superconducting layer for effective magnetic isolation in Josephson integrated circuits," Journal of Applied Physics, vol.101, no.11, pp.114509-1-114509-4, June, 2007. 査読有

(5) T. Hikida, K. Fujiwara, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai, S. Yorozu, "Bit-Error-Rate Measurements of RSFQ Shift Register Memories," IEEE Trans. Applied Superconductivity. vol. 17, June 2007, pp. 512-515. 査読有

[学会発表] (計 212 件)

(1) N. Yoshikawa, K. Nakamiya, "Demonstration of picosecond-delay measurements of high-speed signals by single-flux-quantum double-oscillator time-to-digital converters," 2008 Applied Superconductivity Conference (ASC 2008), August 2008, Chicago, 1EB05.

[その他] ホームページ

<http://www.yoshilab.dnj.ynu.ac.jp/tokutei/index.html>