

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760256

研究課題名（和文）

単一磁束量子回路による高信頼性セルライブラリの生成支援に関する研究

研究課題名（英文）

Study on generation of highly-reliable single-flux-quantum cell library

研究代表者

田中 雅光 (TANAKA MASAMITSU)

名古屋大学・高等研究院・特任助教

研究者番号：10377864

研究成果の概要（和文）：大規模な単一磁束量子（SFQ）デジタル集積回路の設計において必要不可欠な、基本要素回路（セル）の集まりであるセルライブラリの構築に関する研究を行った。信頼性の高いセルを作るため、電源供給方法や性能と消費電力とのトレードオフを含めた種々の検討を行い、従来よりも優れたセル設計指針を見いだした。また、レイアウト設計支援ツールを開発し、セルライブラリ内で多数を占める配線要素セルの設計自動化を試みた。

研究成果の概要（英文）：The research focused on techniques to generate sets of basic circuit elements (cell libraries), which are essential to design large-scale single-flux-quantum (SFQ) digital circuits. The improved design guidelines to make reliable cells, including power supplying and the tradeoff between performance and power consumptions, were investigated. Several tools were developed for layout design toward automatic generation of wiring cells, which are dominant in cell libraries.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：超伝導集積回路の設計・設計支援

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：単一磁束量子、超伝導素子、計算機設計支援、大規模集積回路

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導デバイスを用いた単一磁束量子（SFQ）回路は、高速性と低消費電力性を兼ね備えた次世代大規模集積回路（LSI）技術として期待されている。SFQ回路は専用のプロセスで作製され、パルス状の電圧信号を論理表現に用いるなど独自の物理的動作原理に基づくため、既存の半導体の論理回路とは異なる、独自の設計技術が必要である。

大規模な SFQ LSI を設計する手法として、セルベース設計法による方法が有効である。セルベース設計法は基本的な SFQ 回路要素を

「セル」として作成してライブラリを構築し、セルを組み合わせる回路全体を設計する手法である。予め用意しておいたセルを使うことで設計効率は格段に上がり、数千から一万余素子を集積した簡単なマイクロプロセッサや超高速演算器が数十GHz、数mWで動作することが実証されていた。SFQ回路の高い潜在能力が多数示される中で、今後はより高度な設計技術の進展なしには実用化は望めない段階に来ている。

SFQ回路はピコ秒のタイミング設計を要する上、ばらつきやノイズの影響を受けやすい。

これまでは熟練者がセルを手で設計してきたが、セルライブラリの構築には豊富な経験と、膨大な時間と労力が必要である。幸い、セルライブラリは一度構築しておけば暫くは使用できるが、作製プロセスの変化や更新の度にセルライブラリを作り直しては効率が悪い。また、セルライブラリの構築が容易でないことが、革新的な設計技術を提案していく上で障害ともなっている。

半導体のLSI設計ではセルライブラリを自動生成するツールが用いられている。SFQ回路においても、設計の基盤となるセルライブラリの構築を支援するツール開発の必要性が高まってきたと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、より大規模なSFQ LSIの実現を念頭に、セルの設計指針を明確化し、信頼性の高いセルライブラリの構築を支援するツールの開発を目的とする。

まず、セルの設計指針が明確になっていないことがセルライブラリの構築支援を行う上で最も重要な課題であると考えられるので、これまでSFQ回路の設計・実証に関して得られている知見を整理しながら、セルの信頼性に影響を与える物理的要因を明らかにし、実験や数値計算を通して有効な回路パラメータの選定方法やレイアウト設計手法を検討する。このために、同じ超伝導回路試作ラインを共有する他の研究者との情報共有を促進する。得られた結果を反映し、セル設計を支援するツールの開発を目指す。

## 3. 研究の方法

上記で述べた、情報の共有化、セル設計指針の明確化、設計支援ツールの開発の3つの項目に分け、以下に研究方法を述べる。なお、回路の試作は超電導工学研究所に依頼した。

### (1) 情報の共有化

これまでに名古屋大学、超電導工学研究所、情報通信研究機構、横浜国立大学が共同で開発したSFQセルライブラリ(CONNECTセルライブラリ)は、超電導工学研究所の試作ラインを使ってSFQ回路の研究を行っている国内の幾つかの大学に公開されている。セルライブラリには300以上のセルが登録されており、セル及びそれらを使用した回路の歩留まり等を評価するには膨大なデータが必要となる。そこで、実験結果を蓄積し、共有するためのデータベースシステムを運用し、活用することとした。また、SFQ回路の試作担当者や各機関の研究者が参加するメーリングリストを運営し、打ち合わせにも積極的に参加して、SFQ回路設計に関する意見交換を多数行うこととした。

### (2) 設計指針の明確化

まずは既存のセルライブラリの調査を行い、問題点等を抽出することとした。データベースから収集した評価結果に加え、個別のセルをテストするための回路を試作し、評価することとした。これは、問題のあるセルを明らかにすることで既存のセルライブラリの信頼性を向上するとともに、セル設計指針の改善点のヒントを得る狙いがある。

また、これまでにSFQ回路の動作に悪影響を与える要因として挙げられている、グラウンド面を流れるリターン電流、回路パラメータのばらつき、電源供給に伴う磁場ノイズ、冷却時の磁束トラップといった課題に対する設計指針をまとめるため、実験と数値計算による検討を行うこととした。さらに、SFQ回路の電源電圧の選定方法に注目し、性能と消費電力とのトレードオフを明らかにすることで、新たなセル設計指針の作成を試みた。

### (3) 設計支援ツールの開発

本研究では、セルライブラリの再構築時にもっとも必要性の高い、レイアウト設計の支援に目標を定め、ツールの開発を進めることとした。

また、SFQ回路では、信号の分岐など配線要素にも能動素子を含む独自の回路が必要である。このような配線要素は、機能は比較的単純であるが、柔軟な設計を可能とするためには形状の異なる多数のセルをライブラリに用意することが必要であり、セルライブラリの構築作業の手間となっている。そこで、配線要素セルをターゲットとし、レイアウト生成を支援するツールの作成を試みた。

## 4. 研究成果

研究成果についても、同様に3つの項目に分けて記述し、最後に総括を述べる。

### (1) 情報の共有化

超電導工学研究所の試作ラインを使って作製されたSFQ回路の評価結果を収集し、共有するためのデータベースシステムを構築した(図1)。超電導工学研究所の試作ラインを利用している国内の他の研究機関に参加を呼びかけ、3年の研究期間内で約3000件の実験結果を収集した。ここでは、実験結果を体系的に整理できるよう、評価の概要をグループ分けして登録するよう工夫を行った。この成果により、後述するセルの歩留まり等を解析することが可能となった。

構築したデータベースの解析から得られた情報には、例えば超電導工学研究所の移転後、回路の動作マージンは以前と変わらないものの、数千素子規模の回路において歩留まりが低下していたといったものも含まれており、試作担当者への有益なフィードバック

となった。また、各研究者個人で測定・評価できる回路の数は限られていることから、SFQ 回路設計にかかわる研究者同士で意見交換を行う上で、有意義な役割を果たした。データベースシステムと同様に運用を行っているメーリングリストにも、学生を含む多数の研究者が参加しており、研究機関の枠を超えた重要なコミュニケーション手段を提供してきた。本研究終了後、もこれらの運用は継続したいと考えている。

図1 実験結果データベースの画面。参加者はWeb ブラウザを用いて自由にアクセスできる。

## (2) 設計指針の明確化

CONNECT セルライブラリに含まれる、60 種以上のセルについて、テスト回路を試作し、歩留まりや電源電圧に対する動作マージンを詳細に調査した。結果を図2に示す。既存のセルは試行錯誤の上で開発が進められてきた経緯があり、回路パラメータが十分最適化されていなかったり、作製パラメータの経年変化の影響を受けていたりする可能性が考えられる。歩留まりや動作マージンが不十分と思われるセルについては設計を見直して改善を行い、セルライブラリの信頼性を向上させた。CONNECT セルライブラリの実績への評価は高く、海外の研究者からも利用したいという声があり、本成果は多くの研究者へ貢献するものと期待する。

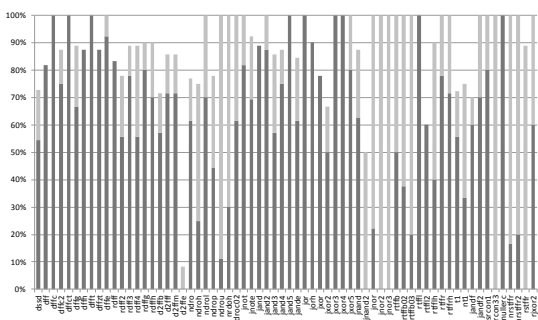


図2 セルの歩留まり調査結果。濃色は十分な動作マージンが得られたもの、薄色はややマージンが狭いが正常動作を確認できたものの割合を表す。

設計課題の一つであった、グランド面を流れるリターン電流の影響については、セル設

計時に余計な経路に電流が流れないように対策を行うことで、大規模なSFQ 回路において効果があることを確認した(図3)。この手法では、消費電力とレイアウト面積が増大する欠点があるため、現在の超電導工学研究所の標準プロセスで実現可能な回路規模においては導入の必要はないと考えられるが、次世代多層化プロセスにおけるセル設計に向け、リターン電流を制御するよう適切にグランド面を使用することが重要であることを示唆する結果が得られたと考えている。

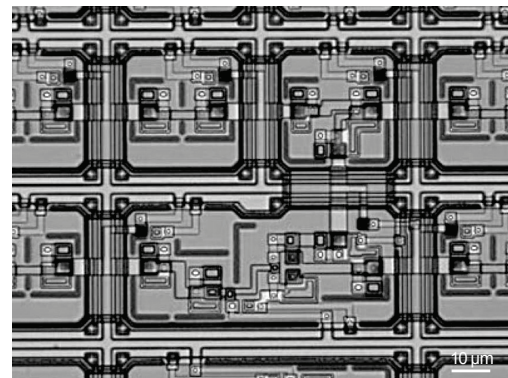


図3 グランド面を流れる電流を制御するための抵抗を追加して設計したセルの顕微鏡写真。一辺の単位長さは45 ミクロン。300 mA 程度の大きな電流が集中する状況下でも10%程度の動作マージンの改善が見られた。

従来のSFQ 回路の設計指針で曖昧であった事項の一つに、回路を駆動するバイアス電圧の決定方法があった。SFQ 回路では、回路を構成するジョセフソン接合が意図した通りにスイッチ動作するように、一定のバイアス電流を供給しておく必要がある。SFQ LSI では、この電流は共通の電圧源からバイアス調整用の抵抗を介して供給される。

数値解析から、バイアス電圧を変えることで回路の動作速度と消費電力を調節することができると明らかとなったので、設計指針に反映させることを目的とし、テスト回路を試作して歩留まりやバイアス電圧に対する動作マージンを調査した。その結果、バイアス電圧を現在の値(2.5 mV)の1/10から10倍程度まで変化させても、歩留まりや動作マージンに大きな劣化がないことがわかった。

図4に実験により得られた動作速度の比較を示すが、バイアス電圧  $I_B$  を1.25 mV から20 mV に増加するに従い、素子の遅延時間は小さくなる。これは、バイアス電圧を高くするにつれてより理想的な電流源が形成され、ジョセフソン接合のスイッチングに影響されことなく一定のバイアス電流を供給し続けることが可能であるためと考えられる。

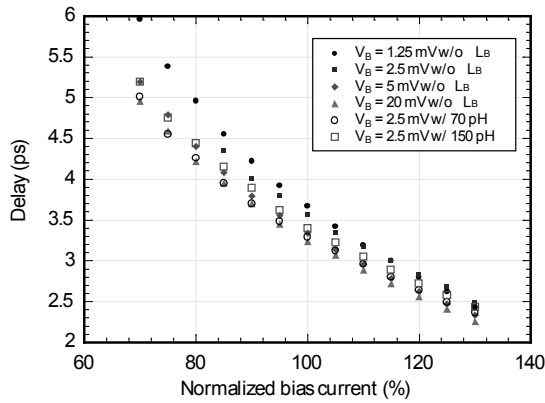


図4 スイッチ時間のバイアス電圧依存。横軸は設計値で規格化したバイアス電流値。

バイアス供給線に数十 pH の大きなインダクタ  $L_B$  を挿入することによっても同様の効果が得られるが、大きすぎる  $L_B$  は時定数の増大を招き、逆効果であった。

SFQ 回路においてバイアス抵抗が消費する電力（静的消費電力）はバイアス電圧に比例するため、特に、その電圧を下げることは大幅な低消費電力化につながるため、数値計算と実験により低電圧駆動によるセルの特性を詳細に評価した。その結果、電圧を現在の設計の 1/5 から 1/10 となる、数百ミリボルトに設定した時にもっとも高いエネルギー効率を達成できることが分かった。これは、通常ジョセフソン接合がスイッチする際に両端に発生する電圧と同程度の値であり、従来の定電流源駆動とは異なる動作モードである。これより高い電圧では、定電流駆動に近くなり、少しスイッチ時間が短縮される一方で静的消費電力が大幅に増大する領域、低い電圧では駆動力不足からスイッチ時間が極端に増大する領域として解釈できる。図5に数値計算で得た、消費エネルギーのバイアス電圧依存をまとめる。

また、ジョセフソン接合の臨界電流値  $I_C$  に関しても検討を行い、現在の 1/4 程度まで小さくしても十分な歩留まりをもつセルを作成することが可能であると分かった。当初、バイアス電圧の低減化だけでは、微少な抵抗が必要となることがレイアウト設計上の課題となり、大幅な消費電力の削減は難しいと考えていたが、これらを組み合わせることにより、消費電力が従来よりも一桁以上小さなセルの設計指針を見いだすことができた。

実験では、ジョセフソン接合あたりの消費電力を 1/10, 1/50, 1/100, 1/500 に低減したセルを試作し、シフトレジスタの高速動作実証に成功した。図6に実験結果を示す。バイアス電圧が極度に低い 1/500 の回路では速度の低下と動作マージンの減少が見られたが、それ以外の回路は十分な動作速度とマージンが得られている。

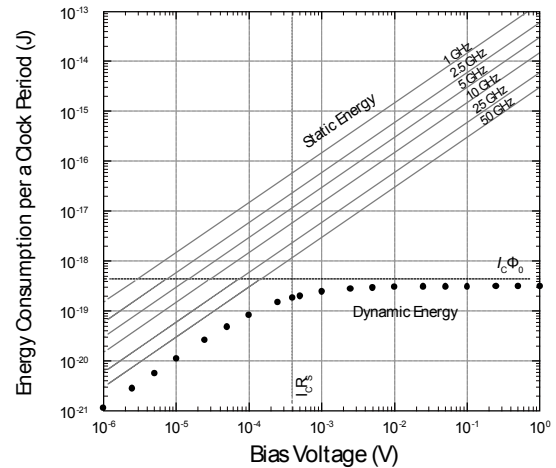


図5 クロック周期内にバイアス抵抗（静的）とジョセフソン接合（動的）が消費するエネルギーのバイアス電圧依存。

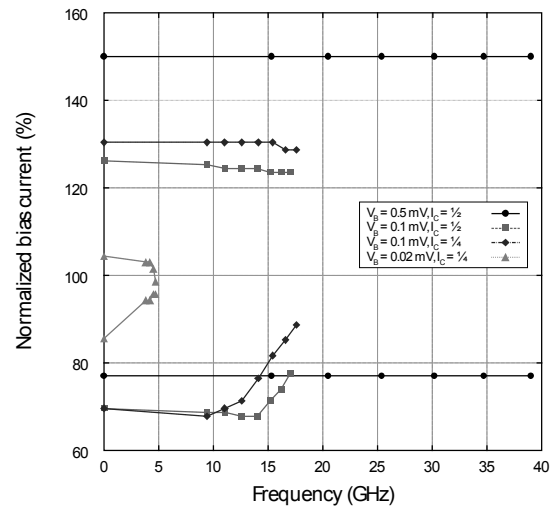


図6 低電圧駆動シフトレジスタの動作マージンと動作周波数の関係。折れ線で囲まれた領域が正常動作範囲を示す。

### (3) 設計支援ツールの開発

プロセス技術の更新などがなくても、小規模なセルライブラリの再構築が必要になる場合がある。その一つに、超電導工学研究所の移転に伴い、エッチング条件が変わったため生じた、縮小値（レイアウト設計で指定したサイズと実際の加工寸法との差）の変化が挙げられる。変化は 0.1-0.2 ミクロンと僅かであったが、セルライブラリの信頼性向上のためには設計に反映することが望ましいと考えられるため、本研究ではセルのレイアウトを自動修正するツールをまず開発した。バイアス供給線やセルの境界など縮小値を考慮する必要のない部分を自動判別するよう工夫を行い、レイアウトの生成、回路パラメータの計算、タイミング情報の抽出を自動化した。これにより、移転後 2 回セルライブラリの再構築を行ったが、いずれも実質 1 日程度で完了することができた。プロセスパラメ

一タの変化は、さまざまな要因により起こる可能性があるが、小規模なセルライブラリの再構築には迅速に対応できるようになった意義は大きい。

SFQ 回路では、信号の分岐など配線要素にも能動素子を含む独自の回路が必要である。セルの設計自動化に関しては、配線要素セルをターゲットとし、レイアウト生成を支援するプログラムの作成を試みた。配線要素セルは、柔軟な設計を可能とするため、形状の異なる多数のセルをライブラリに用意することが必要であり、セルライブラリ構築作業の効率化への貢献が期待される。

#### (4) 総括

基本要素回路（セル）の設計に関しては、既存のセルライブラリの問題点の抽出と信頼性向上のための改善を行ったほか、電源供給方法や消費電力の観点からも検討を進め、大規模 SFQ 集積回路に向けより優れたセルの設計指針を見いだしたなど、有益な成果が得られたと考えている。

設計の自動化に関しては、まだ改善の余地が残るが、小規模なセルライブラリの改版がほぼ自動化できるようになったことと、セルライブラリ内で多数を占める配線要素セルの作成支援の足がかりができたことの意義は大きいと考える。

本研究の成果をさらに発展させ、信頼性の高いセルライブラリが容易に構築できるようになれば、今後プロセスや設計技術の進展へ簡単に対応でき、SFQ 回路応用の研究全体に大きく貢献できると期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(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 1 件)

- ① M. Tanaka, M. Ito, A. Kitayama, T. Kouketsu, A. Fujimaki: 18-GHz, 4.0-aJ/bit Operation of Ultra-Low-Energy Rapid Single-Flux-Quantum Shift Registers, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 51, 2012, pp. 053102 (4 pages), DOI: 10.1143/JJAP.51.053102.

[学会発表] (計 3 件)

- ① M. Tanaka: Multi-Layered Single-Flux-Quantum Circuits Designed Using Timing-Driven Automatic Routing, Superconductivity Centennial Conference, 2011.9.19, Den Haag (Netherlands).
- ② M. Tanaka: Design Automation and High-Speed Demonstration of

Single-Flux-Quantum Large-Scale Reconfigurable Data-Path Accelerator Circuits, 23rd Int. Symposium on Superconductivity, 2010.11.3, Tsukuba (Japan).

- ③ M. Tanaka: 100-GHz single-flux-quantum bit-serial adder based on 10-kA/cm<sup>2</sup> niobium process, Appl. Supercond. Conf., 2010.8.4, Washington, D.C. (USA).

[その他]

研究成果ホームページ  
<http://leporis.org/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

田中 雅光 (TANAKA MASAMITSU)  
名古屋大学・高等研究院・特任助教  
研究者番号: 10377864

##### (2) 研究分担者なし

##### (3) 連携研究者なし