

戦略的創造研究推進事業 CREST

研究領域

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

研究課題

「超伝導量子ビットシステムの研究開発」

研究終了報告書

研究期間 平成15年10月～平成21年3月

研究代表者：蔡 兆申

(日本電気(株)ナノエレクトロニクス研究所
主席研究員)

§ 1 研究実施の概要

ジョセフソン接合量子ビットは固体素子量子ビットでは研究が最も進んでいる量子ビットである。この研究では、デコヒーレンス時間ができるだけ長く、より速く駆動できる量子ビットの研究を目指してきた。量子ビットを駆動するための方形又はマイクロ波パルスは、通常では室温の電子回路でまかなっているが、これを量子ビットと同様な極低温環境にある超伝導超高速回路に置き換えることで、より速い量子ビットの駆動ができる可能性がある。同時にこのような超伝導インターフェイス回路は量子ビットの高精度な読み出しやデコヒーレンスの抑圧、そしてシステムの冷却にも効果的である可能性もある。単一磁束を利用する超伝導集積回路は、最も高速で最も低消費電力な集積回路技術であり、極低温超高速回路の有力候補である。このような考えに基づいて、量子ビットそのものの研究、および量子ビットの駆動や読み出しを行う超伝導周辺回路の研究を行い、最終的にはそれらを組み合わせて超伝導量子ビットシステムとしての動作を目指した研究を行ってきた。

これまで数々の量子ビットが提案されているが、ビット数のスケールアップの可能性という点では、半導体集積回路のバッチ処理に基づく製造技術の流用が可能な固体電子素子で量子ビットを構成する事が有利であると考えられている。我々のグループは 1999 年に初めての固体素子量子ビットを実現した。これはジョセフソントンネル接合回路により構成された超伝導量子ビットである。固体素子量子ビットの提案は数多くあるが、超伝導量子ビット以外に現在実現しているのは、半導体量子ドット系での1ビットの操作の例があるのみである。

固体電子素子のような巨視的系に現れる量子状態は、デコヒーレンスが短いと一般的には信じられてきたが、これまでの実験ですでに数マイクロ秒程度のデコヒーレンス時間が得られている。これはエネルギー準位の差で換算すると数万回程度の量子ゲート操作が可能なることに相当し、大変勇気付けられる結果である。この結果はジョセフソン系の自由度が強く制限されていて、系内部の散逸や外部環境の影響を比較的受けにくいことの現れであると考えられる。実用的な量子コンピュータを考えた場合、可能な量子計算ステップ数の増加、そして結合している量子ビット数の増加という明白な目標がある。そのほかにも量子ビット制御の精度向上や、量子状態の読み出しの精度向上が必要であると考えられている。本研究はこれらの課題を克服することを目的とした、複合的超伝導システムの研究である。

本研究では超伝導量子ビットシステムの研究を提案している。このシステムは、その心臓部である量子ビット回路、制御用の室温回路、そしてその中間に位置する超伝導インターフェイス回路で構成される。本研究の主な研究項目は、超伝導量子ビットシステム中の超伝導量子ビット回路とそれに接続される超伝導インターフェイス回路である。本研究の研究は、超伝導量子ビット回路の集積化、超寿命化の研究と、同様なジョセフソン接合回路で構成されるより古典的な領域で動作する超高速、超低消費電力の量子ビット周辺回路技術の研究開発と、これら二つの技術の融合の可能性を探索する研究である。

超伝導量子ビットに代表される固体量子ビットは、極限的に静かな環境で動作するのに対し、それを観測し操作しようとする室温環境には多くの雑音が存在する。古典的演算システムとして究極的な性能を持つ単一磁束量子演算回路を用いて、これらの環境を分離し、インターフェイスを構成することは、超伝導量子ビットシステムを実現する上で極めて有効な手段であると考えられる。また、量子ビット数のスケールアップを考えた場合、多数の量子ビットを極低温下で高速かつ正確に制御、観測できる単一磁束量子演算回路の利用は、量子ビットシステムの構築において必要不可欠な手段であると考えられる。

超伝導インターフェイス回路は現存の Nb 系ジョセフソン集積回路技術を使って構成する。したがって量子ビット自体もこの集積回路技術とサブミクロン微細加工工程を融合し作成する事により、同一チップ上にインターフェイス回路も作ることも可能である。量子ビット回路自体の研究は、NEC グループでの実験を中心とした研究と、理研グループの理論研究によって進めてきた。実験では計画として超伝導量子ビット回路の研究を掲げ、高速かつ正確な制御インターフェイス、読み出しインターフェイス、量子ビットの長いデコヒーレンス時間、集積化へ向けた結合方式などの確立を目指した。当初は電荷量子ビット中心に研究をスタートしたが、その後、よりコヒーレンス時間の長い磁束量子ビットに軸足を移し、磁束量子ビット回路における上

記課題の解決に努めた。新しい展開として、超伝導量子ビットと超伝導共振回路の結合系における新しい現象の探索や、超伝導非線形共振回路を利用した量子ビット読み出し方法の確立、超伝導非線形共振回路を利用したマイクロ波低雑音増幅器の開発なども対象とした。

また東京大学グループは、主に NEC グループと協力し、超伝導量子ビットのデザインを中心とした理論研究を行った。特にデコヒーレンス時間の評価を行い、この観点から量子ビットの設計指針を理論的に明らかにすることを目的とする。NEC グループの実験結果について随時討論を行い、理論的な視点から研究・考察を行う。他の研究機関の研究者との共同研究も行き、従来の超伝導接合系にとらわれず、さまざまなタイプの超伝導接合における量子ビットの実現について、理論的に考察する。

理研の理論グループは、本研究計画には遅れて参加し、2006年の夏より始動した。主には実験と対応の取れるジョセフソン量子ビットの理論研究に取り掛かってきた。この方針で、(1)ジョセフソン量子ビットの結合方式、(2)超伝導回路に適合した量子計算手順(クラスター状態やトポロジカル量子計算)、(3)デコヒーレンス低減方式、(4)電磁共振機と結合した超伝導量子ビット、(5)超伝導量子ビットにおける量子状態トモグラフィ、等のテーマについて多くの成果を上げた。

ジョセフソン接合を利用した超伝導量子ビットは、半導体素子と同様のプロセスで作製できるため、容易に多素子化を実現できる可能性がある。本研究では超伝導量子ビットに対する入出力および制御を単一磁束量子(SFQ)回路などの超伝導回路で行うシステムの研究を ISTE C グループが中心になっておこなった。超伝導量子ビットが動作する極低温で動作可能なニオブ SFQ 回路の作製プロセスとして Pd 抵抗体や低臨界電流密度ジョセフソン接合を開発するとともに、100mK 以下の極低温動作を想定した 8 種類の SFQ 回路セル rsfq350 を設計した。これらの回路は熱雑音が大きな液体ヘリウム温度においても正常に動作することを確認できた。また、SFQ 回路と量子ビットの実装方法としてハンダバンプを用いたフリップチップボンディング法を開発した。さらに、量子ビット読み出し用の SQUID アンプの開発を行った。SQUID アンプは半導体増幅器と比べると低雑音で消費電力も小さいという利点を持ち、これにより量子ビット読み出し精度の大幅な向上が期待できる。我々は 10 GHz 程度の周波数で 10 dB のゲイン、1 K 以下のノイズ温度を目標とした SQUID アンプ開発を行い、50mK における測定において周波数 9.5GHz、10dB 以上のゲイン、1K 以下のノイズ温度を持つ SQUID アンプが得られた。本研究により得られた要素技術を組み合わせることにより、超伝導量子ビットの読み出し、制御を行う超伝導システムに道を拓くことができたと考えている。

超伝導量子ビットの状態を正確に制御するためには、高速パルスにより量子振動を誘起する方法と、マイクロ波を照射してラビ振動を誘起する方法がある。いずれの方法においても急峻な立ち上がり特性を有する方形波パルスやマイクロ波パルスが必要となる。横浜国立大学グループでは、超伝導量子ビットの高速かつ正確な状態制御を行うことを目的として、高速動作と消費電力動作を特徴とする単一磁束量子(SFQ)回路を用いた量子ビット操作回路の開発を行った。研究では、まず、SFQ 回路が極低温動作する際に問題となる消費電力を低減するための方法を検討し、新たなバイアス方式を提案した。これにより従来方式の20分の1の消費電力で動作する SFQ 回路を実現した。また、SFQ 回路を用いた方形波パルス発生器を開発し、立ち上がり時間が数十 ps、振幅が約 3mV の電圧パルスの発生が可能な、可変電圧パルス発生器を試作し、その動作検証を行った。次に高速なマイクロ波のスウィッチングが可能な SFQ マイクロ波チョッパーの開発を行った。回路構成の改良により、立ち上がり時間が数十 ps、出力振幅が約 100・V のマイクロ波の出力が可能なチョッパーを実現した。以上のマイクロ波チョッパーを極低温で動作させるための実装方法について検討し、チョッパーモジュールを試作した。

将来の量子計算システムでは、複数の量子ビットの状態を量子ビット自身に擾乱を与えることなく高速で読み出すことが求められる。SFQ 回路の特徴を生かすと、高速かつ高感度の電流検出器の構成が期待できることから、名古屋大学グループでは、SFQ 回路と適合性の高い磁束量子ビットの状態を単一回で読み出す技術の確立を目指した。本研究で提案した SFQ 読み出し回路では、磁束量子ビットの右回り/左回りの電流によって読み出し回路を伝搬する磁束量子の速度を加速/減速し、その結果発生する時間のずれを判定することによって状態を観測する。回路

に対称性を持たせることで読み出し時のバックアクションを低減している。また、量子ビットと読み出し回路間にコイルを設置し、SFQ 回路との熱遮断、擾乱の低減を図っている。反面、読み出し回路には 1K において 100nA 以下の感度が求められる。実験では、感度を決定する回路要因を特定し、その低減化を図ること、さらには回路的な工夫で実質的な感度の向上を図った。SFQ 読み出し回路の感度は、4K ではジョセフソン接合に並列に入るシャント抵抗のジョンソン雑音で最終的には決まることが分かった。雑音は読み出し回路にはジッタの形で出現し、シャント抵抗の付いた接合 1 個当たり 65fs となった。シャント抵抗を取り除く等の工夫により現在は 14fs 以下にまでジッタは低減している。一方、実質的に回路の感度を決めているのは、電流比較器に使われるジョセフソン接合を 2 つ直列にした比較器構造である。この比較器構造のジッタは、最小値では単独接合の $\sqrt{2}$ 倍程度であるが、回路ごとのばらつきが大きく、平均では 365fs と接合の 5-6 倍近くにまで達した。回路の動的な不安定性によるものと考えているが、現在のところ原因が完全には解明されていない。電流感度は、この大きなジッタに支配されており、4K で最小 $0.8 \cdot A$ 、一般的には概ね $2 \sim 6 \cdot A$ が得られている。磁束量子ビットのデコヒーレンス時間 (T_2) は長く、これを利用すると電流感度を実質的に向上させることができる。すなわち、デコヒーレンス時間内に多数回の読み出し操作を実施し、その結果を尤度判定 (多数決判定) することによって状態を判定する。SFQ 回路の内部は数十 GHz でも動作することから、この尤度判定は有効である。実験では、255 回の試行による判定で、電流感度を 15 倍向上することに成功した。温度を 1K に設定し、尤度判定を用いると現在の 1/30 に電流感度を向上できることから、比較器構造のばらつきを抑えられれば、30nA の電流感度が得られることとなる。したがって、当初の目標である量子ビットの単一回読み出しは十分可能と考えている。

量子計算は可逆計算器であるが、古典回路でも可逆計算を行うことは原理的には可能であると考えられている。しかし実験的には、そのような回路はこれまでに存在しなかった。エネルギー散逸の少ない超伝導回路は、古典的可逆回路を実現する理想的な候補である。ニューヨーク州立大学の研究グループはこの大変ユニークな研究を行ってきた。ここでは nSQUID と呼ばれる回路を提案し、実際に実験的にその正常な動作を確認した。可逆計算の最大の特徴は、そこでの散逸が、ビット動作の熱力学の限界エネルギー ($\ln 2 k_B T$) を下回ることが可能だということだ。実験では実際に回路に流れる電流値を測り、エネルギー散逸が、熱力学限界より数倍高い程度であることが示された。この回路は量子的にも磁束量子ビットとしての動作が可能である。高速 SFQ 回路のアナロジーから、このような量子 nSQUID 回路をベルトコンベアー式に並べると、高速で動作し、かつ 1 ビットと 2 ビットの制御が正確に出来る「超伝導飛行量子ビット回路」が構成できると提案した。このような量子計算機は、量子ビット数のオーバーヘッドは大きいですが、ビット間のオンオフが比較的正確に直流電流で制御できる特徴を持つ。

§ 2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

「NEC」グループ

計画として超伝導量子ビット回路の研究を掲げ、高速かつ正確な制御インターフェイス、読み出しインターフェイス、量子ビットの長いデコヒーレンス時間、集積化へ向けた結合方式などの確立を目指した。当初は電荷量子ビット中心に研究をスタートしたが、その後、よりコヒーレンス時間の長い磁束量子ビットに軸足を移し、磁束量子ビット回路における上記課題の解決に努めた。新しい展開として、超伝導量子ビットと超伝導共振回路の結合系における新しい現象の探索や、超伝導非線形共振回路を利用した量子ビット読み出し方法の確立、超伝導非線形共振回路を利用したマイクロ波低雑音増幅器の開発なども対象とした。

「ISTEC」グループ

SFQ 回路を量子ビットの制御に用いるために必要な以下の要素技術の研究を行う。極低温動作 SFQ 回路の作製プロセスを構築するために、量子ビットの動作温度でも使用できる抵抗材料と低臨界電流密度ジョセフソン接合を開発する。量子ビット制御を目指した SFQ-量子ビットハイブリッドモジュールを作製するためのフリップチップボンディング法の開発を行い、超伝導マルチチップモジュール(MCM)技術を開発する。100mK以下の極低温で動作するSFQ回路を構築するための複数のセルからなるセルライブラリを設計し、動作の確認を行う。また、超伝導量子ビットの高精度読み出しを行うための SQUID アンプの開発を行い、100mK 以下の極低温環境下での特性を測定する。

「横浜国立大学」グループ

SFQ 回路を用いた量子ビット操作回路の研究においては、超伝導量子ビットの正確な状態操作を行うことを目的として、パルス発生器とマイクロ波発振器の開発を目指した。量子ビットの正確な状態操作のためには、パルス幅と立ち上がり時間が量子振動周波数よりも十分短い時間スケールで制御された高速パルスが必要である。また、マイクロ波の照射時間間隔も同じような時間スケールで制御できるマイクロ波発振器が必要である。パルス発生器については、SFQ/DC コンバータ、SQUID スタック型ドライバ、ラッチ型ドライバ、HUFFLE 型ドライバなど、幾つかの高速パルスの発生方法を検討した。最終的には DC SQUID とディレイ・フリップ・フロップを結合させ、これらを多数スタック状に配置する方法を検討した。マイクロ波発振器については、Josephson アレイ マイクロ波発振器、リング型 SFQ マイクロ波発信器、Josephson 可変インダクタンス・マイクロ波チョッパー、SFQ マイクロ波チョッパーなど、幾つかのマイクロ波発信器の実現方法を検討した。研究により、ジョセフソン接合を用いた発振器では発振周期のジッターが大きく、量子ビットの正確な操作に対して問題があることが明らかとなった。そのため、発振周波数の安定なマイクロ波は外部から供給し、極低温部でマイクロ波のオンオフを制御するマイクロ波チョッパーを SFQ 回路で構成することとした。また、SFQ 回路を量子ビットと同じ極低温環境下で動作させた場合、それらの発熱が問題となることが明らかとなった。そのため、SFQ 回路の低消費電力化に関する研究を行った。

「名古屋大学」グループ

量子ビットの状態の観測/読み出しの研究は名古屋大学が担当した。読み出しに対する研究提案時のイメージは、当時名古屋大学で開発していた高感度高速 SFQ アナログ-デジタル(A/D)変換器をさらに高度化して、それによって量子ビットの単一回読み出しを目指すと言ったものであった。しかしながら、量子ビットの状態読み出しには、基本的には電流比較器があれば良く、A/D 変換器の持つ振幅方向の多ビット化や時間軸のデジタル化は不要である。発熱の問題や A/D 変換器が結合することによる散逸の増大も考慮し、A/D 変換器のフロントエンド部だけを利用した読み出し回路を提案するに至った。グループ内の打合せにより、最終的な形態では、冷凍機的能力等も考え、SFQ 回路は1K ステージに置くこと、磁束量子ビットの状態は、近傍に設置したピックアップコイルで拾い上げ、インプットコイルによって読み出し回路へ信号を入力することが決められた。前者は、熱雑音から電流感度は一回の計測では 100nA 程度にしか低減できないこと、後者は量子ビットの状態の違いによる電流の変化量が量子ビットのジョセフソン接合の臨界電流値 I_c よりも大幅に低下し、100nA 以下となることも想定されることを意味している。ただし、後者は読み出し回路による量子ビット自身の散逸の増加や読み出し操作によるバックアクションは、大幅に抑制されることも意味している。これを受け、読み出し回路としては、極限性能を目指すこと、さらには回路的な工夫により、実質的な電流感度の向上を目指すことを目標として研究を進めた。極限性能に対しては、実際の読み出し回路の感度を決めている要因を探る必要がある。この観点から、ジョセフソン接合自身の時間ジッタ、時間弁別器の鍵を握るジョセフソン接合を2つ直列にした比較器構造の時間ジッタをさまざまな条件で評価した。この結果を踏まえ、回路パラメータの最適化を進め、電流感度の大幅な向上を図った。また、尤度判定回路の導入によって、実質的な感度の向上を図った。さらには、量子ビットと SFQ 読み出し回路間を断熱低インダクタンスで結合する実装技術も手掛けた。

「理研」グループ

理研の理論グループは、本研究計画には遅れて参加し、2006年の夏より始動した、実質的に2年半研究を行ってきた。主には実験と対応の取れるジョセフソン量子ビットの理論研究に取り掛かってきた。この方針で、(1)ジョセフソン量子ビットの結合方式、(2)超伝導回路に適合した量子計算手順(クラスター状態やトポジカル量子計算)、(3)デコヒーレンス低減方式、(4)電磁共振機と結合した超伝導量子ビット、(5)超伝導量子ビットにおける量子状態トモグラフィー、等のテーマについて多くの成果を上げ、それら結果は主要専門誌に掲載された。

「SUNY」グループ

ニューヨーク州立大学の研究グループは、古典回路でも可逆計算を行というユニークな研究を行ってきた。エネルギー散逸の少ない超伝導回路は、古典的可逆回路を実現する理想的な候補である。ここでは nSQUID と呼ばれる回路を提案し、実際に実験的にその正常な動作を確認した。可逆計算の最大の特徴は、そこでの散逸が、ビット動作の熱力学の限界エネルギー ($\ln 2 k_B T$) を下回ることが可能だということだ。実験では実際に回路に流れる電流値を測り、エネルギー散逸が、熱力学限界より数倍高い程度であることが示せた。この回路は量子的にも磁束量子ビットとしての動作が可能である。高速 SFQ 回路のアナロジーから、このような量子 nSQUID 回路をベルトコンベア一式に並べると、高速で動作し、かつ1ビットと2ビットの制御が正確に出来る「超伝導飛行量子ビット回路」が構成できると提案した。このような量子計算機は、量子ビット数のオーバーヘッドは大きいですが、ビット間のオンオフが比較的正確に直流電流で制御できる特徴を持つ。

「東京大学」グループ

理論グループ(東京大学)では、NEC グループと密に討議を行うことに留意し、実験で生じる新たな課題について、臨機応変に理論的に考察することを目標とした。さまざまなタイプの超伝導量子ビットの理論的評価だけでなく、メーザー発振など微小超伝導接合系で実現される新規な現象についても理論研究を行うことも目標とした。平成18年度からは、ヨーロッパの実験グループ(Twente大学のHilgenkampグループやErlangen大学のUstinovグループなど)との交流を通じ、高温超伝導接合や超伝導・金属強磁性・超伝導接合などの新しいタイプの超伝導素子についての研究を立ち上げた。

(2) 実施体制

グループ名	研究代表者又は主たる共同研究者氏名	所属機関・部署・役職名	研究題目	参加期間
NEC グループ	中村泰信	日本電気(株)ナノエレクトロニクス研究所 主席研究員	量子ビットシステムの研究	H19～H20
NEC グループ	中村泰信	日本電気(株)基礎・環境研究所 主席研究員	量子ビットシステムの研究	H17～H18
NEC グループ	中村泰信	日本電気(株)基礎・環境研究所 主任研究員	量子ビットシステムの研究	H15～H16

ISTEC グループ	日高睦夫	ISTEC 超電導工学研究所デバイス研究開発部低温デバイス開発室室長	量子ビットインターフェイスシステムの高速制御	H15～H20
横浜国立大学グループ	吉川信行	横浜国立大学大学院工学研究院教授	SFQによる量子ビットの操作	H15～H20
名古屋大学グループ	藤巻朗	名古屋大学 大学院工学研究科 量子工学専攻教授	SFQによる量子ビットの高速、高精度観測	H15～H20
理研グループ	ノリ、フランコ	理化学研究所 フロンティア研究システム チームリーダー	量子情報処理の物理的実現のための理論的研究	H18～H20
SUNY グループ	アベリン, V. デミトリ	ニューヨーク州立大学 (SUNY) ストニーブルック校、物理天文学部教授	量子ビット用SFQ設計・実験、超伝導可逆回路	H15～H20
SUNY グループ	セミノフ, ヴァシリー	ニューヨーク州立大学 (SUNY) ストニーブルック校、物理天文学部教授	量子ビット用SFQ設計・実験、超伝導可逆回路	H15～H20
東大グループ	加藤岳生	東京大学物性研究所 助教授	量子ビットの制御・観測に関する理論的評価	H16～H20
大阪市立大学グループ	加藤岳生	大阪市立大学工学研究科 電子情報専攻 数理工学分野 講師	量子ビットの制御・観測に関する理論的評価	H15

§ 3 研究実施内容及び成果

3.1 ジョセフソン接合量子ビットの研究(NEC ナノエレクトロニクス研究所)

(1)研究実施内容及び成果

当グループでは、超伝導量子計算回路の実現へ向けて必要となる基礎技術の確立と関連した物理の理解を目指した研究を行った。特に①超伝導量子ビットのコヒーレンスの改善、②超伝導量子ビット間の相互作用の制御、③超伝導量子ビットの読み出し方法に関する実験を中心に行った。以下に挙げるような成果を得た。

電荷量子ビットのデコヒーレンスの評価と要因の追究 (PRB2004, PRL2004, PRL2006, APL2007)

電荷量子ビット(クーパー対箱)のデコヒーレンスの要因を調べるために詳細な実験を行った。ひとつの有用な実験手法として、電荷量子ビットの単一事象測定方式を提案し実証した。この方法では、クーパー対箱に隣接したトラップ電極に電圧パルスを印加することで、その瞬間にクーパー対箱の状態が $|1\rangle$ 状態すなわち余分なクーパー対が存在する状態であった場合に、電荷がトラップ電極にトンネルし蓄えられる。その電荷を近接した単一電子トランジスタで読み出すことで、量子ビットの状態が判別される。高い読み出しの忠実度(～90%)が得られた。この手法を利用して、電荷量子ビットのエネルギー緩和時間(T_1)のゲート電荷依存性およびジョセフソンエネルギー依存性を調べた。その結果、 T_1 はジョセフソンエネルギーの2乗に反比例し、エネルギー緩和の要因が電荷ノイズに起因することが証明された。またゲート電荷を変化させたときに、その電荷ノイズは量子ビットの特性エネルギーに比例することが見出された。この特性は環境の温度スケールよりもずっと大きいエネルギー領域での結果であり、この電荷ノイズは量子ビットのエネルギーを受け取ることのできる量子揺らぎによるものと考えられる。エネルギーに比例する量子揺らぎはいわゆるオーミック環境で見られるものであるが、この実験における周辺回路に起因する量子揺らぎは実験で見られたものよりもずっと小さいと見積もられた。そこでひとつの可能性として、量子ビット近傍に存在する欠陥などに起因する広いエネルギー分布を持つ多数の量子2準位系がエネルギーの受け皿となってこのような量子雑音を生んでいるというモデルを提唱した。また同じモデルにおいて、低エネルギーの量子2準位系の熱揺らぎが電荷の $1/f$ ノイズを発生して、量子ビットの位相緩和に寄与することも提案した。その場合に $1/f$ ノイズの強度および量子ビットの位相緩和時間はともに温度の2乗に比例することを提案し、その後、実験で確認した。同様の温度依存性は異なる材料の基板上に作製した単一電子トランジスタの電荷ノイズの測定でも確認された。

周辺環境中の多数の量子2準位系によるデコヒーレンスのモデルは理論グループの大きな関心を買ひ、その後いくつもの関連論文がPRL、PRBに掲載されている。またその後の超伝導量子ビットのデコヒーレンスにおける材料の役割の重要性に対する認識の先鞭を付けた研究のひとつである。

磁束量子ビットのデコヒーレンスの評価と要因の追究 (PRL2006)

磁束量子ビットは電荷量子ビットと比べて電荷ノイズの影響を受けにくい。実際、電荷量子ビットよりも長いデコヒーレンス時間(～ μs)が観測されている。本研究では、磁束量子ビットのデコヒーレンス要因を調べるために、エネルギー緩和時間(T_1)や位相緩和時間(T_2)の、バイアス条件依存性を調べた。読み出しのために結合しているSQUIDの電流バイアスに対する依存性では、ゼロバイアス付近で外部電流ノイズの影響が最小となることを見出された。これは回路の対称性により、流入する電流ノイズと量子ビットとの結合がこの点でちょうど打ち消されるからである。逆に、その他のバイアス点における T_1 の変化の様子から、量子ビットの特性周波数における周辺回路環境の持つ量子揺らぎの大きさが決定された。

一方、量子ビットの磁束バイアスに対する依存性では、量子ビットの特性エネルギーが最小となる半量子化磁束のバイアス点で T_2 が最大になることを見出された。このいわゆる最適動作点では、特性エネルギーが磁束の関数として極値を取るため、1次のオーダーで磁束ノイズの影響が打ち消されるからである。実験では、このバイアス点においては、指数関数的な位相緩和が見られ、エコーの手法を用いて測定した T_2 の値が T_1 のほぼ2倍となることを見出され、エネルギー緩和過程がデコヒーレンスの支配的要因となっていることが示された。その一方、ラムゼー干渉測定で測定される位相緩和時間 T_2^* はもう少し短く、低周波揺らぎの効果が無視できないことを示している。エコーの実験ではこのような揺らぎの影響はパルスシーケンスの工夫により取り除かれている。次に磁束バイアスの関数として T_2 および T_2^* の変化を調べた。位相緩和において、その減衰関数が $2T_1$ の時定数を持つ指数関数と T_2 (エコー)および T_2^* (ラムゼー干渉)の時定数を持つガウス関数の積で表されている。

ることを観測した。ともに最適動作点から離れるとともに、磁束バイアスのオフセットに反比例して急速に短くなることを見出された。この結果は磁束の $1/f$ ノイズの存在を示しており、測定された緩和時間から $1/f$ 雑音の大きさが決定された。また $1/f$ ノイズの高周波カットオフの下限を与えるなど、ノイズの起源を考察するために有用な情報を得た。

磁束バイアスの関数として、量子ビットの特性エネルギーを数 GHz から約 20 GHz まで変化させ、エネルギー緩和の観測を行った。 T_1 は磁束の関数ではなく、すなわち磁束の変化の符号によらず、特性エネルギーの関数として変化することを見出した。 T_1 の変化は計算される量子ビットの磁束ノイズや電荷ノイズあるいはジョセフソンエネルギーの揺らぎに対する遷移行列要素の変化とは一致せず、非単調に振舞いかつ時折スパイク上に T_1 が短くなる特異点を示した。このことは T_1 に寄与する環境の量子揺らぎが単純なスペクトルを持たず、特異なエネルギー依存性を持つことを示している。その原因はまだ未解明であるが、量子ビットのデコヒーレンスの要因を調べる上で貴重な情報である。

このような測定と解析は、量子ビットのデコヒーレンスを調べることで、その周辺環境のノイズスペクトルを測定しているものと理解することもできる。しかも今の場合、量子ビットの励起状態からの緩和時間すなわち T_1 の測定を行うことで、通常のスเปクトラムアナライザーでは測定不可能な環境の零点揺らぎすなわち量子雑音を観測していることに相当する。一方、位相緩和 T_2 の測定は主に低周波ノイズの測定プローブとなり、古典ノイズの直接的な測定結果と関連付けられる。本研究は、1980 年代からずっと未解決である、SQUID 素子における低周波磁束ノイズの問題が再び注目を集めるきっかけのひとつとなり、現在その微視的な機構について実験・理論の面から活発な研究が行われている。

磁束量子ビット間の可変結合の提案と実証(PRB2006, PRB2006, Science2007, PRB2008)
超伝導磁束量子ビット間の相互作用は磁氣的な結合により近接した量子ビット間に容易に実現される。そのような研究はすでにいくつかのグループによって行われている。しかしながらこの結合は固定的であり、任意にオンオフすることができない。言うならば、2 ビットゲートは可能になる代わりに、個々の量子ビットを単独に制御する 1 ビットゲートができなくなってしまう。そこで本研究では、量子ビット間の相互作用をダイナミカルにオンオフできる可変結合方式を提案し実証した。以前から磁束量子ビット間に、SQUID を利用した可変トランスフォーマーを設けて、相互作用を制御するという方式は提案されていた。しかしながら、量子ビットが半量子化磁束でバイアスされ磁束ノイズによる位相緩和を一番受けにくい状況にあるとき、量子ビットの固有エネルギー基底で表現すると磁氣的相互作用は非対角相互作用項となるため、特性エネルギーの異なる磁束量子ビット間では相互作用が働かないという欠点があった。そこで本研究では、2 つの磁束量子ビットの間に非線形「量子」トランスフォーマーとして、もうひとつの特性エネルギーの十分大きい量子ビットを設けることを提案した。この結合用量子ビットは、その大きな特性エネルギーのために、いつも基底状態にあると仮定される。2 つの結合されるべき量子ビットは、直接的にまた結合用量子ビットを介して間接的に磁氣的相互作用をしているが、特性エネルギーの差が大きいために、この弱い非対角相互作用は無視できる。さらには直接的相互作用と間接的相互作用の符号が逆なため、パラメータを調節することで相互作用を完全に打ち消すこともできる。この状況では 2 つの量子ビット間の相互作用はオフ状態にある。相互作用をオンにするためには、結合用量子ビットにマイクロ波を印加し、磁束バイアスを変調する。これにより、間接的相互作用項が周期的変調を受けることになる。これは結合用量子ビットが非線形なトランスフォーマーとして振舞うためである。その変調周波数が 2 つの被結合量子ビットの特性周波数の和に相当するときに、パラメトリックな効果により $|00\rangle$ と $|11\rangle$ の状態の間でラビ振動が起こり、2 ビットゲートが実現する。これにより iSWAP ゲートを実現することができ、相互作用オフのときに個々の量子ビットのラビ振動で実現する 1 ビットゲートとの組み合わせで万能量子ゲートを実現できることになる。

実験では直列に並んだ 3 つの磁束量子ビットを用いて行った。まず 3 量子ビット系の詳細なスペクトロスコープを磁場の関数として行うことで、系のパラメータを厳密に決定するこ

とに成功した。また和周波数を駆動することで、 $|00\rangle$ と $|11\rangle$ の状態の間のラビ振動を観測し、結合をオンにできることを示した。この2ビットゲートと1ビットゲートを組み合わせた単純なプロトコルで、スピノル回転の 4π 周期性を実験でデモンストレーションした。またその後の実験では結合用量子ビットの磁束バイアスに対する結合強度と残留結合強度の依存性を綿密に調べ、それらが3量子ビットからなる8準位のハミルトニアンにより非常によく記述されることを見出した。このモデルを用いて可変結合量子ビット回路実験におけるパラメータの最適化を行った。この方式を用いた量子アルゴリズム実証を目指して研究を続けている。

結合した超伝導量子ビットの制御実験としては、キャパシタで結合した位相量子ビットを用いた実験や、超伝導共振器を介した位相量子ビット間あるいは電荷量子ビット間の相互作用の実験が他のグループで行われている。ただしいずれの方式も基本的には量子ビット間のエネルギー差を制御することにより、固定された非対角結合項の寄与を実効的にオンオフしている。量子ビットの特性エネルギーを変化させるので、回転座標系に則った制御ができずパルスのタイミング制御に対する要求がより厳しくなる。本研究で提案した方式では、すべての制御を回転座標系上で行うことができるのでより扱いやすいと考えられる。

電荷量子ビット間の可変結合の実験 (PRB2008)

電荷量子ビットでも同様の可変結合の実験を試みた。ここでは2つの電荷量子ビットを最も電荷ノイズの影響を受けにくいゲート電圧でバイアスした状態で、それぞれの量子ビットと結合した大きい単一ジョセフソン接合を介した対角結合項を利用し、その結合強度を制御することを目指した。

本研究では、二つの電荷量子ビットを別の単一ジョセフソン接合のジョセフソンインダクタンスで結合した回路を作製した。二つの電荷量子ビットは、SQUID構造を持っており、ループを貫く磁束によって巡回電流の大きさが変化する。ループを貫く磁束が磁束量子の整数倍の時は、巡回電流はゼロとなるため二つの量子ビットは結合しないが、整数倍からずれると、有限の巡回電流が発生し、結合が発生する。実験では、様々な外部磁場下においてスペクトロスコピーの手法を用いて結合量子ビット系のエネルギー準位を調べた。結果はバンド計算から予想される結果と定量的によく一致しており、特にそれぞれの量子ビットと単一ジョセフソン接合のプラズマモードとの結合による反交差の大きさが外部磁場によって変化することが確認された。これは、量子ビットと単一ジョセフソン接合のプラズマモードとの間の結合が、外部磁場によって制御できたことを示している。この結果に基づき、量子ビット間の結合の変化を実験的に実証すべく、コヒーレント振動の測定を行った。しかしながらコヒーレンス時間が十分でなかったため、結合の変化を示す明瞭な結果は得られなかった。

磁束量子ビットと超伝導共振器の強結合 (PRB2007、PRB2008 出版予定)

2004年にYale大学のグループが提案・実証した回路量子電磁力学 (Circuit QED) は、これまで主に原子光学の分野で研究されてきたいわゆる空洞共振器量子電磁力学 (Cavity QED) を、超伝導量子ビットと超伝導共振器の組み合わせにより、チップ上の電気回路を用いて実現するというものである。同グループは超伝導コプレーナ型共振器と結合した電荷量子ビットを用いた研究を進め、ここ数年、目覚ましい成果を挙げている。一方、磁束量子ビットを用いた Circuit QED の実験は、Q 値の比較的低い LC 共振回路を利用した実験が他のグループによって行われてきた。本研究では、磁束量子ビットを高い Q 値を持つ超伝導コプレーナ型共振器に強く結合させ、量子ビットと共振器からなる複合量子系を実現した。

実験では Nb からなる共振周波数約 10 GHz、Q 値約 7000 の超伝導コプレーナ型共振器に Al からなる磁束量子ビットを磁氣的に結合した。得られた結合エネルギーは約 120 MHz で、これは量子ビットの緩和時間や共振器の緩和時間に比べはるかに大きく、いわゆる強結合領域が実現された。共鳴条件化における真空ラビ分裂や、非共鳴条件化での分

散的相互作用による AC ゼーマンシフトが観測された。一方、量子ビットを共振器中に配置することで量子ビットから見た周辺環境をよく制御することが可能になる。すなわち量子ビットは共振器モードを通してのみ外部環境と相互作用することになる。これを利用して量子ビットのデコヒーレンス時間の改善が期待される。さらに本研究では、2つの対称な量子ビットを共振器に反対称的に結合することにより、量子ビットのエネルギー緩和が、個々の量子ビットに等しく結合する大域的な揺らぎに起因するのか、個々の量子ビットに局所的に影響する揺らぎに起因するのかを判定する実験を提案した。これは2ビット系における特定の励起状態がその対称性により大域的な揺らぎによっては緩和しないという性質に注目したものである。

磁束量子ビットを用いた Circuit QED の実験はまだ端緒についたばかりであり、今後の進展が期待される。特に磁束量子ビットのデコヒーレンスに関する有用な情報が得られることを期待する。また磁束量子ビットは、位相量子ビットやジョセフソンエネルギーが大きく電荷ノイズの影響を受けにくい電荷量子ビットの改良版に比べ、非調和性すなわち量子ビットに用いる 2 準位系とその次の励起準位のエネルギーの隔たりが大きいという利点がある。共振器中に余分な励起準位を持ち込まないという点で、共振器と複数の量子ビットを結合するときには有利になると考えられる。さらに量子ビットと共振器の分散的相互作用を利用した量子ビットの非破壊読み出しの実現も期待される。

単一人工原子レーザーの提案と実証 (Nature2007)

Circuit QED の応用例として人工単一原子レーザーを提案し実証した。通常のレーザーやレーザーでは、多数の原子・分子あるいはそれに準ずる量子準位系が共振器モードと弱く結合している。しかしながら原子と共振器モードの間の結合を強め、またポンピングの効率を高めることで、共振器中の単一の原子のみによるレーザー発振を行うことも可能である。そのような実験は、光学共振器中にトラップされた冷却原子や、マイクロ波共振器中を通過するリユードバリ原子などを用いて実現されている。本研究では、これをチップ上の超伝導共振回路と人工原子としての超伝導量子ビットに置き換えて単一人工原子レーザーを実現した。

人工原子として用いられたのは電荷量子ビット(クーパー対箱)である。これを超伝導コブレーナ型共振器中に配置し、静電的に共振器と結合した。またクーパー対箱には電流注入用に高抵抗のトンネル接合を介した電極を設け、これに電流を流すことで量子ビットに反転分布を形成した。励起されたクーパー対箱は、共鳴する共振器に光子を放出しながら基底状態に緩和する。そこにまた2つの電子が供給され、クーパー対箱は励起される。クーパー対箱が光子を放出する過程は、共振器中に光子が蓄えられると誘導過程によりさらに増強される。実験では、共振器中の光子の減衰レートが、量子ビットと共振器モードとの結合強度や量子ビットのポンピングレートよりも十分小さいくなるようにして、量子ビットから放出された光子が共振器中に十分長く留まり、次の光子放出を誘導するような状況を実現した。電流注入のみによる自発的発光を観測すると同時に、外部から弱いマイクロ波をシード光として入力したときには注入ロッキングにより発振位相がロックされ、入力信号が増幅されることを観測した。

量子ビットと調和振動子としての共振器との結合は、現在、原子を用いた Cavity QED、超伝導量子ビットを用いた Circuit QED の分野だけではなく、共振器をナノスケールの機械的共振器に置き換えた NEMS の分野でも盛んに研究されている。本研究で実現した、電気回路ならではの電流注入による単一人工原子レーザーのアイデアは、理論・実験の両面においてそのような分野の研究と密接に関連している。また今回の実験は電荷量子ビットを用いて実現したが、電荷ノイズの影響で素子の動作が不安定であった。磁束量子ビットなど他の量子ビットを用いて同様な発振機構が実現可能かどうか検討中である。

磁束駆動型パラメトリック増幅器の提案と実証 (APL2008)

ジョセフソン接合のユニークな点は、それが散逸を伴わない回路要素であると同時に、大き

な非線形性をもつインダクタとして働くということである。超伝導量子ビットを実現するにあたってこの性質が鍵となっている。一方、量子ビットだけではなく、この非線形性を活かして様々な機能を持つ回路を実現することが可能になる。その1つの例として本研究では磁束駆動型のパラメトリック増幅器を提案し実証した。ジョセフソン接合を用いたパラメトリック増幅器の歴史は長く、1970年代から研究が行われてきた。そこでは非線形インダクタとしてのジョセフソン接合を交流電流駆動することにより、実効的な可変インダクタを実現し、パラメトリック効果を得ていた。一方、二つのジョセフソン接合を並列にした dc SQUID と呼ばれる構造を用いれば、SQUID のループを貫く磁束を制御することによっても、可変インダクタを実現することができる。我々は、中心導体を dc SQUID で終端した超伝導コプレーナ型共振器を作製し、同デバイスが、パラメトリック増幅器として動作することを確認した。具体的には、ある直流磁束バイアス下における共振周波数の二倍の周波数で SQUID ループを貫く磁束を変調(ポンプ)すると、共振器に入射する共振周波数付近の周波数の信号が、ポンプとの相対位相に応じて増幅または減衰されることを確認した。本デバイスの実用上の利点は、主に二つある。一つは、直流磁束バイアスによって、増幅器の帯域中心を大きく変化させることが出来るという点である。二つ目は、本デバイスを縮退モードで動作させた場合でも、ポンプとシグナルの周波数は 2 倍異なるため、両者の分離が容易である点である。二つ目については、磁束駆動方式の特徴といえる。なぜならば電流駆動方式の場合、ジョセフソンインダクタが二次の非線形係数を持たないため、ジョセフソン接合が直流電流バイアスされていないと、ポンプと信号の周波数が同じになってしまうからである。

本デバイスの応用範囲は広く、マイクロ波帯域における微小信号の増幅全般に利用できる。特に二つの直行位相振幅のうち一つのみを読めばよいような状況においては(例えば共振器—量子ビット結合系における分散読出し)、雑音を全く付加せずに信号を増幅することが、原理的には可能であり、単一試行で高効率の非破壊読み出しが実現できる可能性がある。一方、本デバイスは増幅器としてだけでなく、スクイーズドマイクロ波発生源として用いることも可能であり、例えば c-QED タイプの実験において新たな発展が期待できる。

非線形共振器を用いた磁束量子ビットの読み出し方法の提案と実証(未発表)

これまでの磁束量子ビットの実験は主に、量子ビットに磁氣的に結合した SQUID に電流パルスを加えたときの電圧状態へのスイッチングを利用してきた。量子ビットの状態に応じてスイッチングの閾値電流が変化するので、スイッチングが起こるか否かで量子状態を判別することができる。しかしながらこの方法では電圧状態にスイッチした場合に SQUID から発生する大きな雑音を読み出し後の量子ビットの状態を乱してしまうので、いわゆる量子非破壊測定を実現することは困難である。また測定対象の量子ビットのみならず近隣の量子ビットも大きな影響を受けてしまい、例えば2つの量子ビットの状態を同時に個々に測定しようとする際の障害となっている。そこで我々は、共振周波数の高い(~ 10 GHz)非線形コプレーナ型共振器の一部を構成する SQUID に磁束量子ビットを磁氣的に結合させ、共振器のマイクロ波応答を通じて量子ビットの状態を読み出す方法を提案し、実験を行っている。量子ビットとの相互作用により、共振器を強く駆動した際非線形応答に現れる分岐現象の閾値が変化することを利用して、量子ビットの状態の判別を行う。量子ビットの特性周波数は 10 GHz よりも十分小さく、相互作用は分散的になるので、量子ビットと共振器の間ではエネルギーの移動はなく、読み出しにより固有状態に射影された量子ビットの状態は非破壊のまま保たれる。実験では読み出しに成功している。まだ低い($\sim 15\%$)忠実度を改善すること、非破壊性を評価することが今後の課題である。

同様な非線形共振器を用いた磁束量子ビットの読み出しは、共振周波数の低い(~ 1 GHz)集中定数型の LC 共振回路を用いて、高い読み出し忠実度($\sim 90\%$)と非破壊性が実証されている(Lupascu et al., Nature Phys. 2007)。本研究では、共振器の共振周波数を高くすることで、共振器中の熱励起による光子数揺らぎを防ぎ、読み出しを行っていない間に読み出し回路が引き起こす量子ビットの位相緩和を防ぐことを目指している。

(2)研究成果の今後期待される効果

(1)で述べたように、この5年間で超伝導量子ビット回路の特性とその理解は、コヒーレンス・個々の量子ビットの制御・量子ビット間の制御・量子ビットの読み出しの各観点において顕著な進展を見せた。まだ直ちに大規模な量子演算回路を実現するには困難が多く残されているが、少なくとも今後数年の展開として以下のような点が期待される。人工的に設計・製作される電気回路の中で自在に量子系の制御ができるようになるということは、量子力学という非日常的で捉えがたいものを手元に引き寄せるといって科学技術におけるパラダイムシフトを起こすものである。

複数量子ビットと可変結合方式を用いた量子アルゴリズムの実証

現在までに1量子ビットの制御と2量子ビットの間の相互作用の制御ができるようになってきているので、これらを組み合わせて簡単な量子アルゴリズムの実証実験を行うことが可能になると期待される。ただし将来の発展のために重要なことは2ビット、3ビットに留まらず任意のスケールまで拡張可能なアーキテクチャを見通した上で、それに必要な要素技術を確立していくことである。そこでひとつの重要な要素となるのは量子ビット間の相互作用をオンオフできるような可変結合方式であると考えられる。

超伝導量子ビットのコヒーレンスの改善

量子ビットのコヒーレンス時間は長ければ長いほど良いという意味では永遠の課題でもあるが、周辺回路の電磁場環境によるデコヒーレンスの見積もりからは、少なくとももう2～3桁の改善は期待してもよいと考えられる。現状ではまだ完全に明らかにされていないデコヒーレンスの主要因を解明し、それを取り除くことが重要である。最近の研究では、材料に起因する微視的な欠陥などからくる揺らぎが寄与していることが示唆されている。量子ビットを構成する基板・配線・接合などの材料やプロセスを丹念に見直す必要がある。コヒーレンス時間が1桁でも2桁でも改善すると、超伝導量子ビットを用いた実験の可能性が大きく広がることが期待される。

プローブとしての超伝導量子ビット

デコヒーレンスが重要な課題となっていることから明らかなように、超伝導量子ビットは周辺環境の揺らぎに大変敏感になりうる。この点を活かして、局所的な揺らぎを観測するためのプローブとして用いることができると考えられる。人工的な量子力学系、例えば他の量子ビットや共振器などの測定に用いるだけでなく、材料に固有な微視的な揺らぎや、固体物理的な意味での励起の観測などに展開できると興味深い。その対象はバルクの測定では検出が難しかった表面・界面に固有の現象や、ナノスケール構造に特有の現象などがふさわしいと考えられる。

異種量子力学系との結合

Circuit QED のアイデアでは、超伝導量子ビットと超伝導共振回路の組み合わせにより、新しい物理現象と超伝導量子回路の自由度の飛躍がもたらされた。自在に設計可能でかつ大きな双極子モーメントを持つ人工原子としての超伝導量子ビットは、他にも様々な量子力学系と結合させて、複合量子力学系として動作させることが期待できる。すでにナノスケールの機械的振動モードとの結合に関しては研究が始まりつつある。

量子限界測定と量子フィードバック

量子情報処理の将来においては量子エラー訂正技術が必須になると考えられるが、それも含めた広い意味での量子フィードバックに関する実験はまだあまり進んでいない。対象となる量子系を(部分的に)観測し、その結果をフィードバックすることで量子系の時間発展を制御する技術が期待されている。これまで特に超伝導量子ビットの分野では観測技術が

未熟であり、その測定信号に大きなノイズが含まれてしまうため、フィードバックに用いることは困難であった。今後、読み出しに用いる超伝導低雑音増幅器などの性能を改善して量子限界に近くかつ帯域の広い測定技術を確立することで、新しい可能性が開けてくることが期待される。

3.2 量子ビットインターフェイスシステムの高速度制御 (ISTEC 日高グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

3.2.1 量子ビット/超伝導回路MCMスキーム

超伝導量子ビットに対する入出力および制御を単一磁束量子 (SFQ) 回路などの超伝導回路で行うシステムにおいては、SFQ 回路などの超伝導回路が量子ビットに与える発熱の影響やノイズの影響を最小化する必要がある。また、量子ビットと超伝導回路を最適な材料やプロセスで作製するためには、両者を別々に作製する必要がある。これらのことから、量子ビットと超伝導回路を別チップで作製し、それらを超伝導配線を施した基板上に配置する量子ビット/超伝導回路マルチチップモジュール (MCM) スキーム (図 1) を提案した。この方法を用いると量子ビットと超伝導回路は別々に作製することが可能となるため、作製プロセスの自由度を飛躍的に高めることができる。

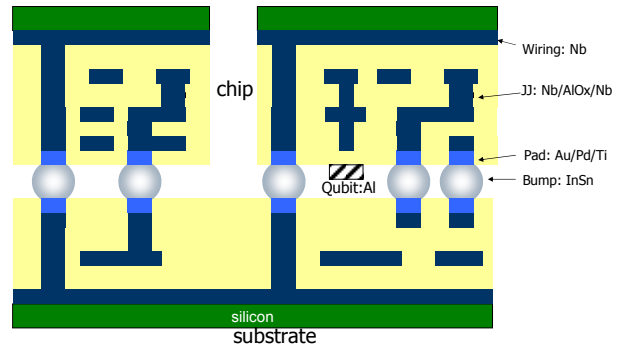


図 1 超伝導量子ビットと制御用超伝導回路を集積した超伝導 MCM の模式図

3.2.2 極低温ニオブ回路製造プロセス

SFQ 回路および SQUID などの超伝導回路の作製には、ISTEC が開発した標準プロセス II と呼ばれるニオブ集積回路作製プロセス [1] を一部修正したものをを用いた。SFQ 回路を量子ビットと同じミリケルビン温度領域に置く場合、熱雑音に対応したレベルまでジョセフソン接合の臨界電流値を下げて発熱を抑制することが重要である。プロセス的にはトンネルバリア形成時の酸化条件の制御により、ジョセフソン接合の臨界電流値を 4.2K 動作の $2,500\text{A}/\text{cm}^2$ から $1/7$ の $350\text{A}/\text{cm}^2$ に下げ、この低臨界電流に対応した。設計では、SFQ ループにおける臨界電流値とインダクタンスの積を一定に維持するためにレイアウトの変更を行った。また、4.2K 動作の SFQ 回路で抵抗体として用いているモリブデンは極低温では超伝導体となるため、パラジウムを極低温における抵抗体としてテストした結果、安定して使用できることを確認できた。これらの結果を取り入れた基本的な SFQ 回路 (DC/SFQ-JTL-SFQ/DC) を試作し、4.2K と 0.35K において測定を行った。測定においては外来ノイズ削減を行い、最小臨界電流値が $12\mu\text{A}$ と通常の SFQ 回路と比べて約 $1/10$ の大きさであったにもかかわらず、4.2K で 0.02%、0.35K で 0.002% のビットエラーレートが得られた。

3.2.3 超伝導 MCM

超伝導ジョセフソン接合回路は熱により特性が劣化するため、融点の低い (117°C) インジウムスズのハンダを用いたフリップチップボンディングプロセスを開発した。このプロセスで MCM を試作し、100Gbps 以上の高速のパルスの伝送を実証した。フリップチップボンディングを行うためにはハンダを回路基板上のパッドに盛る必要がある (図 2)。我々はメッキも含めいくつかの方式を試した結果、ハンダバンプを形成する基板を裏向きに、融解したハンダ槽上に浮かべる方法でハンダバンプを形成した。このとき、基板上に金のパターンを形成することで選択的にハンダバンプを形成することができる。このプロセスではハンダ槽の温度、使用するフラックス、基板をハンダに浮かべる時間などの条件により形成されるハン

ダバンプの品質が決まる。我々はこの条件を最適化し、直径 $15\mu\text{m}$ 以上の大きさのパッドで実用的なハンダバンプを形成できるプロセスを確立した。フリップチップボンディングプロセスの信頼性を確かめるため、250 個以上のバンプが直列に接続されて、一つでもバンプの接続が破壊されると全体の導通が失われるようなチップを作成して、その評価を行った。その結果 10 回以上の冷却サイクルでも良好な導通は失われず、また少なくとも一年の評価期間では経時変化は見られなかった。

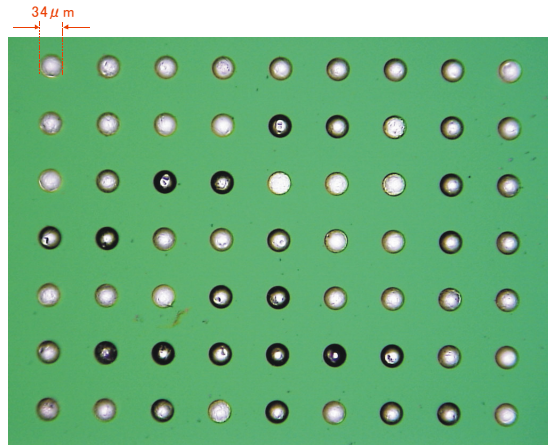


図 2 シリコン基板上に形成したハンダバンプの例

3.2.4 極低温 SFQ セル

超伝導量子ビットの動作温度は典型的に 100mK 以下である。このような極低温では熱容量、熱伝導度が液体ヘリウム温度である 4.2K と比較して 3 桁から 4 桁小さくなるため、通常の SFQ 回路ではそれほど問題では無い発熱が極めて重要になってくる。具体的には、典型的に数 mW 程度である SFQ 回路の消費電力を $10\mu\text{W}$ 程度に下げる必要がある[2]。

SFQ 回路の消費電力を小さくするためには、回路を構成するジョセフソン接合の臨界電流を下げる必要がある。ジョセフソン接合の臨界電流を下げる方法は主に二通りに分かれる。一つは臨界電流密度を一定に保ったまま、接合の面積を小さくする方法で、もう一つは接合の面積を一定に保ったまま臨界電流密度を下げる方法である。前者の方法だと高周波特性を維持したまま臨界電流値を下げるのが可能だが、プロセス設備の大きな変更無しに接合面積を小さくすることは難しい。逆に後者では高周波での特性が悪化するものの、プロセスのわずかな変更で臨界電流密度を下げるができる。そこで我々は臨界電流密度を下げるにより、ジョセフソン接合の臨界電流を下げることにした。

具体的にはISTEC標準プロセスIIで用いられている $2.5\text{kA}/\text{cm}^2$ という臨界電流密度の七分の一である $350\text{A}/\text{cm}^2$ で回路の設計、試作を行った。この場合、消費電力は標準的な回路の場合の 50 分の 1 になることが期待される

ジョセフソン接合の臨界電流値を下げた場合に問題になるのは、熱ノイズによって接合が誤ってスイッチしてしまうことである。しかし我々がシミュレーションで計算した限り、 4.2K で動作させても誤動作はほとんど見られないことが期待され、実際に試作した回路では電氣的な雑音を減らすことにより、 4.2K でも動作を評価することができた。このことから、試作した回路を安価で容易な液体ヘリウム温度で評価することが可能になり、評価に必要な時間を大幅に短縮できるようになった。

実際に使用する回路を構成するためには、基本となる論理セルを設計しておき、それを組み合わせることによって複雑な機能を実現する手法が一般的である。そのため、我々は 8 種類の $350\text{A}/\text{cm}^2$ プロセス用の論理回路セルを設計し、rsfq350 と名づけた。rsfq350 の基本セルは $70\mu\text{m}$ 角の正方形を基本として成り立っており、これを組み合わせていくことにより複雑な機能を実現できる(図 3)。

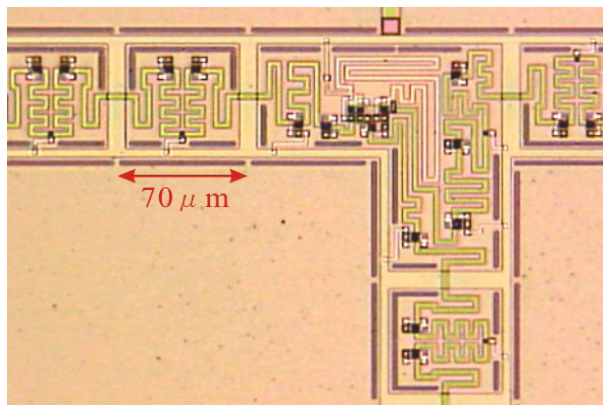


図 3 rsfq350 セルの一例

rsfq350 の回路を実際に試作して評価したところ、液体ヘリウム温度でも回路が動作することを確認できた (図 4)。しかし 10% 程度の誤動作が起こる場合もあり、実用的な回路を構成するためには誤動作を減らすためのさらなる改良が必要である。

3.2.5 SQUID アンプ

量子ビットの読み出し方式としてマイクロ波を用いる場合[3]、図 5 の構成のように微少な信号を低雑音で読み出す必要がある。一般的に増幅器の雑音レベルは熱雑音に換算して雑音温度という単位で表され、雑音温度が低ければ低いほど増幅器の雑音は小さい。ただし雑音温度には量子ゆらぎによって制約される量子限界という下限があり、一般的な増幅器は量子限界を超えることはできない。比較的使用頻度の高い 10GHz を例にとると、量子限界は 0.25 K で極低温で動作する低雑音半導体増幅器の雑音温度は 5 K 程度と量子限界の 10 倍以上である。仮に 10 GHz で量子限界の数倍程度、雑音温度にして 1 K 以下の低雑音増幅器が実現できれば量子ビットの読み出し精度が大幅に向上することが期待できる。

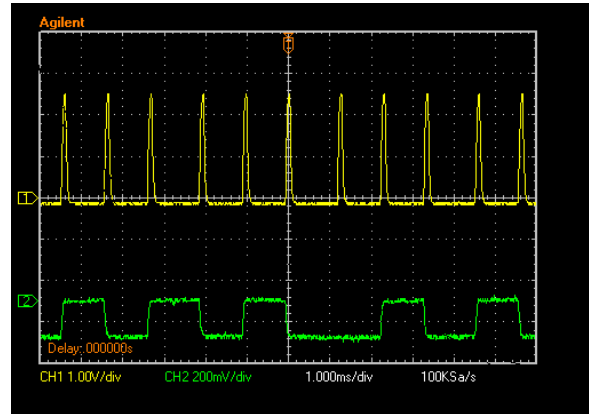


図 4 rsfq350 を用いた回路の動作例 (4.2K)

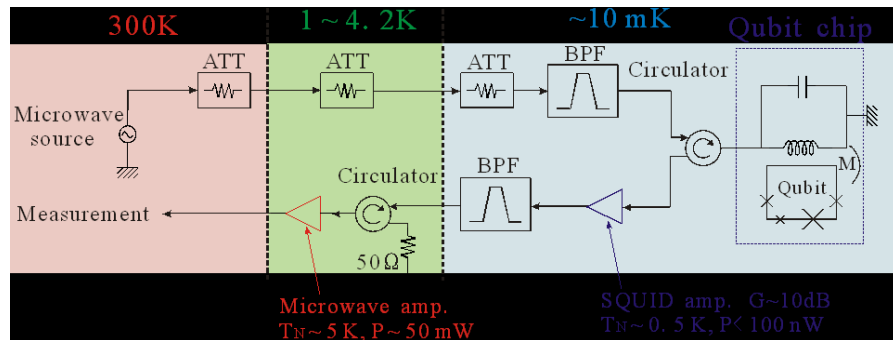


図 5 SQUID アンプを用いた量子ビット読み出しの例

一方、超伝導ジョセフソン接合を利用した超伝導磁束干渉量子素子(SQUID)は低雑音、かつ高速で動作することが知られており、SQUID を利用した高周波増幅回路は 1980 年代には提案され、実際に製作されてきた[4]。その中でも 4 GHz で約 10 dB というゲインと約 0.5 K の雑音温度(量子限界は 0.1 K)を実現した Prokopenko らの研究[5]は注目に値する。

これらの先行する研究を参考として、我々は量子ビットの読み出しに利用するためのマイクロ波用 SQUID 増幅器の開発に着手した。我々のグループの量子ビットで利用されることが多い 10 GHz 程度の周波数で 10 dB のゲイン、1 K 以下のノイズ温度を当面の目標とした。また SQUID を利用したマイクロ波増幅回路は LC 共振回路を利用するため、本質的に限られた帯域の信号のみを増幅するが、1 GHz 程度の帯域を確保することを目指した。更に極低温で使用する増幅回路は低消費電力であることが望ましいが、SQUID は半導体増幅器と比較すると低消費電力であり、我々の開発する SQUID 増幅器の消費電力も 1 μ W より十分小さい値で設計した。

典型的な SQUID 素子の入出力インピーダンスは数~十数 Ω と一般的に高周波で使用される 50 Ω と比較すると低いため、増幅回路の入出力にはインピーダンス整合回路を設けた。またチップサイズは 2.5 mm 角としたがこれは 10 GHz のマイクロ波のシリコン基板上で

の波長(~1 cm)と比較すると小さいため、集中定数的な手法で回路設計を行った。

先行する開発と異なる点として、回路シミュレーションを多用して開発に要する労力、時間を短縮した。具体的には Whiteley Research の WRSpice というジョセフソン接合のモデルを持つ SPICE を利用し、非常に幅広い周波数特性を持つホワイトノイズを入力し、回路の周波数特性を求めるという手法で回路パラメータの最適化を行った。また FastHenry/FastCap というツールを利用して、インダクタ/キャパシタの物理的設計を行った。

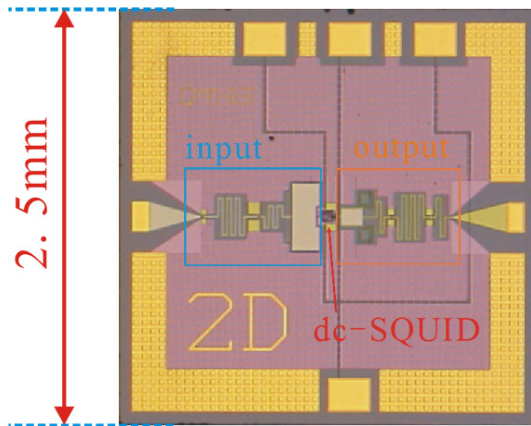


図6 高周波用 SQUID 増幅器

図6に実際に試作した SQUID 増幅回路のチップ写真を示す。全体の大きさは 2.5mm×2.5mm で、高周波信号は左端のパッドから入力される。青線で囲まれた入力インピーダンスの整合回路を経て dc-SQUID で増幅され、橙線で囲まれた出力整合回路を通り、信号は右端のパッドから出力される。チップの縁を囲む金のパッドはグラウンドで、上下のパッドは DC バイアスの供給用である。またこの回路では抵抗の材料として SFQ で一般的なモリブデンではなくパラジウムを用いており、1 K 以下の極低温に冷却しても抵抗が超伝導に転移することはない。

図7は製作した SQUID 増幅器を希釈冷凍機で約 50 mK まで冷却して得られた特性である。上図は SQUID 増幅器の周波数=ゲイン特性で赤の実線が実測値を、緑の点線が SPICE シミュレーションで計算された設計値を示している。設計上の中心周波数は 10 GHz だが、実際の素子では約 9.5 GHz と低くなっている。これはシリコン酸化膜の非誘電率 ϵ_r を小さめに見積もったため、キャパシタの容量が設計値より大きくなったためだと考えられる。またゲインの最大値は設計値より大きい 10 dB 以上が得られているが、帯域は設計値より狭くなっている。これは後で述べるフィードバックの効果によると考えられる。

下図は標準的な Y-factor 方で測定した SQUID 増幅器のノイズ温度である。緑の実線は実測値を、赤と青の点線はそれぞれ上限と下限値 (1 σ) を示している。また黄色の実線は量子限界である。図より雑音温度の最良値は 1 K を下回り、量子限界の 2~3 倍程度になっている。

このように製作した SQUID 増幅器は帯域が狭いながらも良好な動作を示したが、安定性という面で課題を残した。

図8は図7と同じ素子の特性をほとんど同じ条件で、素子にかかる磁気バイアスをわずかに変化させて測定したものである。図7同様に上図が周波数=ゲイン特性を、下図が

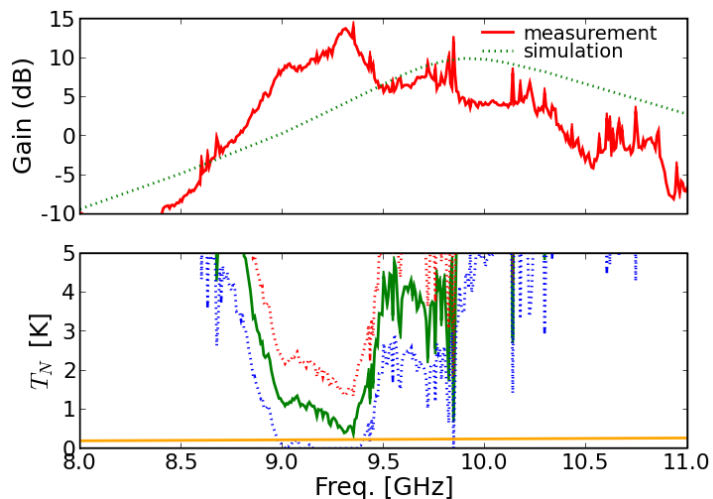


図7 SQUID 増幅器の動作特性。周波数=ゲイン特性(上図、赤線は実測値、緑線はシミュレーションによる予測値)と周波数=ノイズ温度特性(下図、緑線は実測値、赤線と青線は上限値及び下限値)

周波数=雑音温度特性を示している。この測定では SQUID 増幅器のゲインが中心周波数だけで非常に大きな値を示し、ほとんど発振状態にある。このような状態では下図からも明らかかなように良好な雑音特性は期待できない。また図 7 のような特性を得られる動作点は非常に限られており、実用的に使用する増幅器としては安定性に大きな問題があるといえる。そこで我々は SPICE シミュレーションを用いて SQUID 増幅器の不安定性の原因を追及した。その結果、チップ上のグラウンドを介して増幅器の出力が入力にフィードバックとして戻り、それが全体としての帯域を狭めたり、安定性を損なっていることが明らかになった。このことからチップ上で入力と出力のグラウンドを分離した増幅回路を試作し、実際に動作させてみたところ、確かに回路の安定性の向上が見られた。

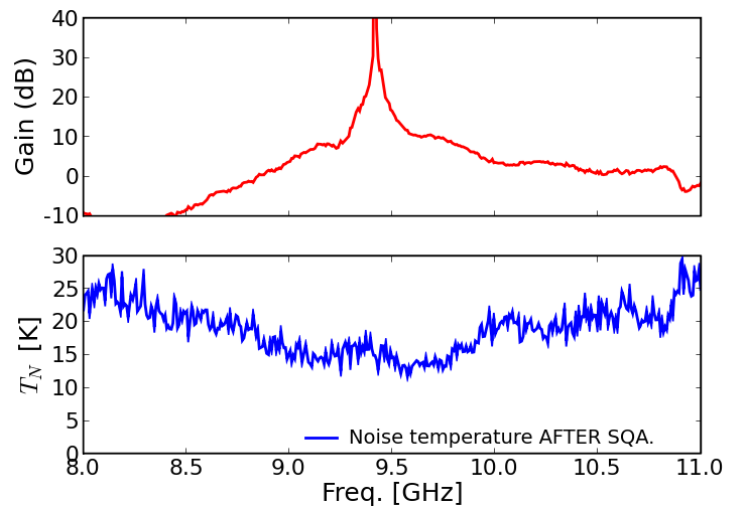


図 8 図 7 と同じ素子の動作点をわずかに変化させて得られた周波数=ゲイン特性(上図)と周波数=雑音温度特性(下図)

3.2.6 まとめ

超伝導量子ビットに対する入出力および制御を SFQ 回路などの超伝導回路で行うシステムを構築するために、1K 以下の極低温で動作するニオブ回路の製造プロセス、量子ビットと超伝導回路を超伝導配線を施した基板上に配置する超伝導 MCM、極低温で動作する SFQ 回路セル、低ノイズ・低消費電力の SQUID アンプを開発した。これらの技術を組み合わせることによって、超伝導量子ビット回路の書き込み・読み出し及び制御を行う超伝導回路を組み込んだ量子ビットシステムへの道が拓けると思われる。

参考文献

- [1] S. Nagasawa, *et al.* “A 380 ps, 9.5 mW Josephson 4-Kbit RAM operated at a high bit yield,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5**, 2447 (1995)
- [2] A. M. Savin *et al.*, Thermal budget of superconducting digital circuits at subkelvin temperatures, *J. Appl. Phys.* **99**, 084501 (2006)
- [3] I. Siddiqi *et al.*, Direct Observation of Dynamical Switching between Two Driven Oscillation States of a Josephson Junction, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 027005 (2005)
- [4] C. Hilbert and J. Clarke, DC SQUIDS as Radiofrequency Amplifiers, *J. Low Temp. Phys.* **61**, 263 (1985)
- [5] G. V. Prokopenko *et al.*, Study of a Multi-Channel RF Amplifier Based on DC SQUID for 3-5 GHz Band, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 741 (2005)

(2)研究成果の今後期待される効果

1K 以下の極低温仕様 SFQ 回路作製プロセスおよび設計技術確立により、今後超伝導量子ビットの入出力および制御を行う超伝導回路作製に道を拓くことができた。超伝導 MCM 技術を立ち上げ、100Gbps 以上のチップ間高速パルス伝送を実証できたことにより、超伝導量子ビットとこれをサポートする異なる材料・プロセスで作製した超伝導回路を、熱やノイズの影響を最小化しつつ結合できることを示すことができた。高速 SQUID アンプ研究により、半導体の限界を大きく越え量子限界に迫る低ノイズ、低消費電力の量子ビット読み出し回路を

超伝導回路で実現できることを示すことができた。今後これらの技術を統合することにより、超伝導量子ビットに最適な入出力、制御回路実現が期待でき、超伝導量子コンピュータに近づくことができる。また、これらの技術は量子通信や電波天文だけでなく多くの応用が期待できる超伝導検出器や超伝導デジタル回路応用などにも展開が可能であり、本研究の成果はこれらの分野にも大きく貢献することができると考えられる。

3. 3 SFQによる量子ビットの操作(横浜国立大学グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

超伝導量子ビットの正確な状態操作のためには、パルス幅と立ち上がり時間が量子振動周期より十分短い時間スケールで正確に制御された高速パルスが必要である。また、マイクロ波の照射時間間隔も同じような時間スケールの精度で可変にできる可変振幅マイクロ波発振器が必要である。本研究では、SFQ回路を用いて作成した高性能パルス発生器とマイクロ波発振器を超伝導量子ビットと同じ極低温環境下で動作させ、その状態を高速に操作する方法について研究した。

研究では、まず、SFQ回路が極低温動作する際に問題となる消費電力を低減するための方法を検討し、次にSFQ回路を用いた高速方形波パルス発生器の開発、ならびにマイクロ波の高速なスイッチングが可能なSFQマイクロ波チョッパーの開発を行った。以下にそれぞれの研究項目について、その成果を示す。

① SFQ回路の低消費電力化

SFQ回路は半導体回路に対して極めて低い消費電力で動作するが、極低温での動作を考えると、その消費電力が問題となる。たとえば、1000接合規模のSFQ回路で、通常の回路パラメータを仮定すると約100 μ Wの消費電力となる。

通常、SFQ回路は電流源で駆動されるが、これらは、抵抗と電圧源から成る電流源で構成される。これに対して本研究では、電流バイアス回路をインダクタンスと微小抵抗で構成し、SFQ回路の消費電力の低減を図った。図1に抵抗と電圧源で構成される通常の定電流バイアス回路を、図2に本研究で提案した大きなインダクタンスと微小抵抗で構成されるLRバイアス供給回路を示す。LRバイアス法では、十分大きなインダクタンスを用いることで電源電圧を小さくできるため、バイアス回路で消費される電力を大幅に低減できる。

本研究では、SFQパルス幅と回路の動作周波数に対して、バイアス回路のインダクタンスと抵抗のパラメータ条件を検討し、回路が正常に動作するパラメータ範囲を明らかにした。また、実際にSFQ論理ゲートを試作し、論理ゲートの動作検証を行った。表1にこれまでに検討したSFQ論理ゲートのDCバイアスマージン(回路の正常動作範囲)の評価結果を示す。これより、各論理ゲートにおいて理論的にも実験的にも十分に大きな動作マージンが得られていることがわかる。

更に、本手法を用いた低消費電力型の10GHzクロック発生器において、 10^{-10} 以下の低エラーレートでの高速動作を検証した。以上により、LRバイアス法の導入により、SFQ回路の消費電力を従来の20分の1程度に低減できることを明らかにした。

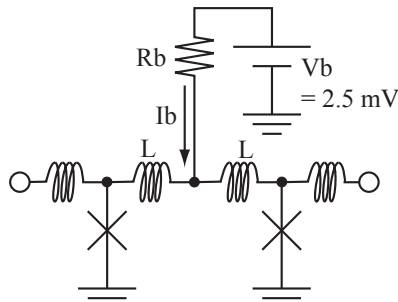


図1 通常のバイアス回路

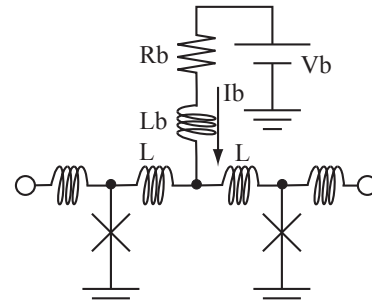


図2 LRバイアス法によるバイアス回路

表1 LRバイアス法を用いたSFQ回路の論理セルのDCバイアスマージン

Cell Name	DC Bias Margins at 10 GHz by simulations	DC Bias Margins by low-speed measurements
JTL	-30 to +45 %	-65 to +41 %
DFF	-27 to +45 %	-44 to +38 %
RTFF	-27 to +39 %	-26 to +25 %
NDRO	-10 to +27 %	-22 to +21 %

②SFQ回路を用いた高速パルス発生器の開発

図3に検討した高速パルス発生器の回路図を示す。回路は、直流バイアスされたDC SQUIDとディレイ・フリップ・フロップ(DFF)により構成される。SQUIDとDFFは互いにインダクティブに結合させている。そのため、DFFの内部状態“0”もしくは“1”に対応してSQUIDの電圧状態を制御することができる。シミュレーションにより、立ち上がり時間が十ps以下の高速電圧パルスの発生が可能であることを明らかにした。更に、本パルス発生器を多段に接続することにより、電圧振幅数mV程度の任意振幅の電圧パルスを発生できることを示した。図4は、20段の高速パルス発生器を試作し、出力電圧の可変性を検証した結果である。図より、振幅3.3mVの電圧パルスが発生していることがわかる。

以上により、SFQ回路を用いて、立ち上がり時間十ps、振幅約3mVの電圧パルスの発生が可能な可変電圧パルス発生器が実現できた。

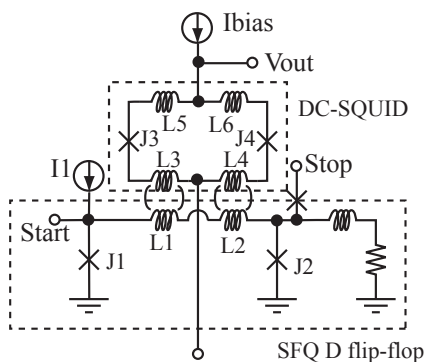


図3 パルス発生器の回路図

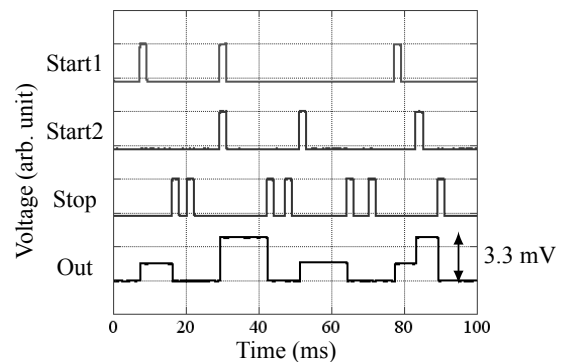


図4 パルス発生器(20段)の出力波形

③SFQ回路を用いたマイクロ波発振器の開発

マイクロ波発振器については、最初においてリング状のジョセフソン伝送線路で構成されたマイクロ波発振器を検討した。発信出力の解析により、本方式の発振器では発振周期のジッターが大きく、量子ビットの正確な操作に対して問題があることが明らかとなった。その

ため、発振周波数の安定なマイクロ波を外部から供給し、極低温部でマイクロ波のオンオフを制御するマイクロ波チョッパーの検討を行った。

チョッパーを実現する方法として、最初に Josephson インダクタンスを利用した可変インピーダンス伝送線路を用いる方法を検討した。本回路は、LC伝送線路のインダクタンスを多段 Josephson インダクタンスで置き換えたものであり、Josephson インダクタンスのバイアス電流を変化させることで、伝送線路のインピーダンスを変化させ、マイクロ波の透過率を変調することができる。本チョッパーについて、シミュレーションにおいて良好な透過率の変調特性を確認したが、実際に試作した試料においては、理論的に期待されるほどの変調効果は得られなかった。これは、実際の試料において多段 Josephson 接合の特性にばらつきがあることに起因すると考えられる。

次に、外部マイクロ波を一旦 SFQ パルスに変換し、SFQ 回路でスイッチングした後、再び帯域フィルターによりマイクロ波に変換する方法について検討した。図 5 に提案したマイクロ波チョッパーのブロック図を、図6に各回路コンポーネントからの出力波形を示す。発振器から出力されたマイクロ波は、まず SFQ 発生器により SFQ パルス列に変換される。SFQ 発生器は、マイクロ波の立ち上がり毎に1つの SFQ パルスを生成する。SFQ 発生器で生成された SFQ パルス列は、SFQ スイッチにより高速でオンオフ制御され、最後に帯域フィルターによりマイクロ波パルスに再変換される。本マイクロ波チョッパーの特徴は、回路構成が簡単であること、また、SFQ による高速なマイクロ波のオンオフ制御が可能な点である。図6より、立ち上り数十 ps 以下の急峻なマイクロ波パルス出力が得られていることがわかる。一方、本方式では、SFQ 回路自体のジッターによるマイクロ線幅のブロード化、マイクロ波の高調波びずみなどの問題が考えられる。本研究では、シミュレーションにより出力特性の評価を行い、有限温度においても十分に小さなスペクトル線幅が得られることを示した。また、急峻な遮断特性を持つ超伝導フィルターを用いることで高調波を十分に除去できることを示した。更に、実際にチョッパー回路を試作し、基本動作の検証を行うと共に、出力マイクロ波線幅の観測を行った。図7は、チョッパーの出力信号の周波数スペクトルである。図より、周波数 7GHz で線幅が数 Hz の良好な発振スペクトルが得られていることがわかる。

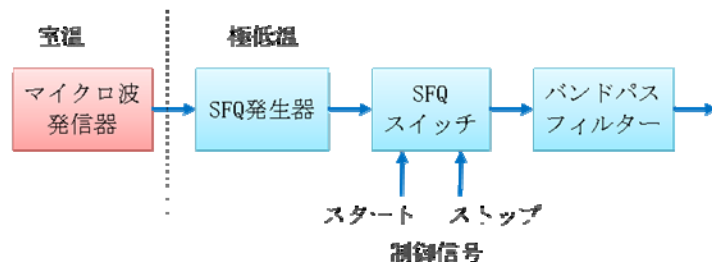


図5 SFQ マイクロ波チョッパーの構成

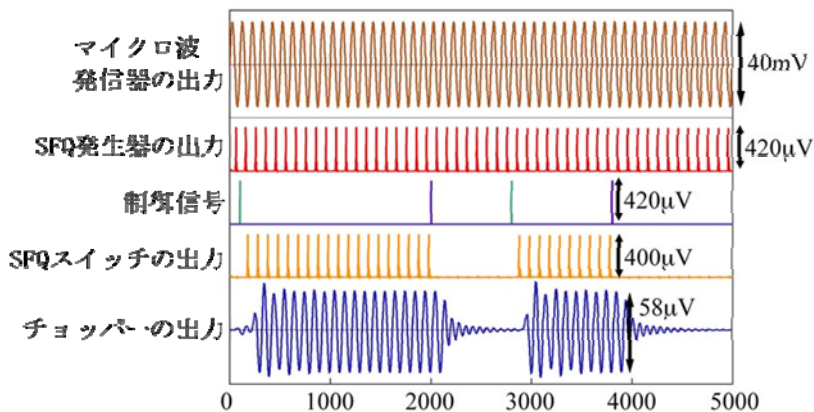


図6 SFQ マイクロ波チョッパーの各コンポーネントの出力波形

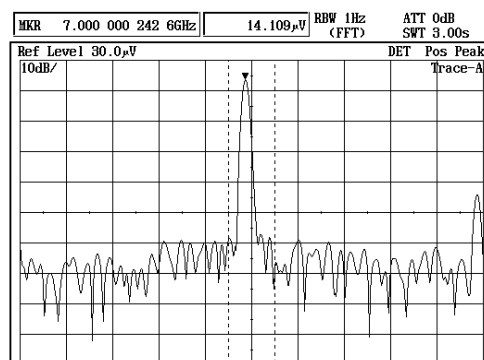


図7 チョッパー出力の周波数スペクトル($f = 7 \text{ GHz}$) 横軸: 10 Hz/div

次に、実際にマイクロ波チョッパーを超伝導量子ビットに接続し、マイクロ波パルスの照射実験を行うことを念頭に、マイクロ波チョッパーの改良を行った。図8には、量子ビットとともにマイクロ波チョッパーをクライオスタットに実装する方法を示す。モジュール化したマイクロ波チョッパーは4.2Kあるいは10mK ステージに置き、チョッパーのマイクロ波出力を同軸ケーブルを用いて量子ビットに接続することとした。マイクロ波チョッパー用チップは、高周波プリントボードボード上にマウントし高周波モジュール中に実装した。図8に示すようにチョッパーチップとプリントボード上の電極はボンディングワイヤによって接続した。

初期のチョッパーの設計では、超伝導フィルターの出力インピーダンス(2Ω)と同軸ケーブルのインピーダンス(50Ω)のマッチングを抵抗回路網で行っていた。その後、より大きなマイクロ波出力パワーを得ることを目的として、バンドパスフィルターの後段にはLC回路で構成されたインピーダンス変換機を接続した。最終的な設計では、超伝導フィルター部を9次チェビシェフフィルターで構成した。図9にはSFQマイクロ波チョッパーの出力振幅の周波数特性を示す。これより、最大 $80 \mu\text{V}$ のマイクロ波出力が得られていることがわかる。8GHz 以上の周波数で出力が減衰するのはマイクロ波フィルターの遮断特性による。また、低周波数で出力振幅が減衰するのは、SFQパルスの密度が周波数に比例して減少するため、出力パワーが減衰するためである。図10にはチョッパーのマイクロ波出力の入力マイクロ波振幅依存性を示す。出力マイクロ波振幅は、入力マイクロ波振幅の増加にしたがって、増大することがわかる。これは、マイクロ波振幅の増加により、一周周期あたり複数のSFQパルスが生成されることに起因する。本効果を利用して、任意の大きさのマイクロ波振幅を得ることができる。

図11には、試作したチョッパーモジュールを希釈冷凍機に実装した様子を示す。チョッパーモジュールは10mK ステージにおかれ、セミリジッドケーブルを用いて量子ビットモジュールに接続した。マイクロ波モジュールの全消費電力は、 $9.6 \mu\text{W}$ である。今後、本チョッパーを用いて、超伝導量子ビットへのマイクロ波パルスの照射を行う予定である。

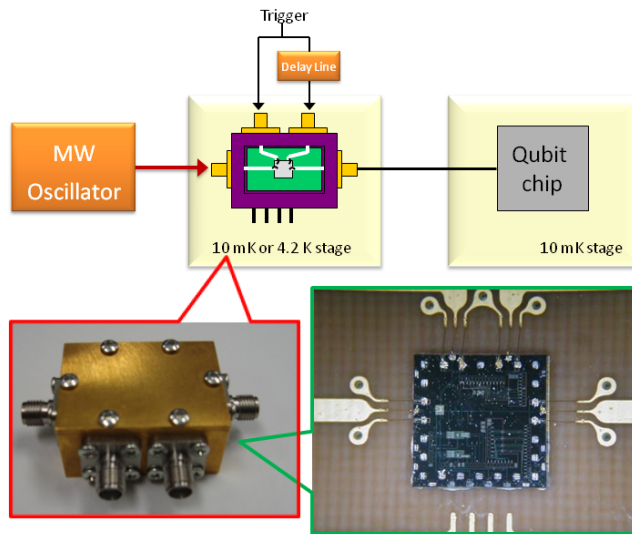


図8 SFQ マイクロ波チョッパーの写真と量子ビットとの接続方法

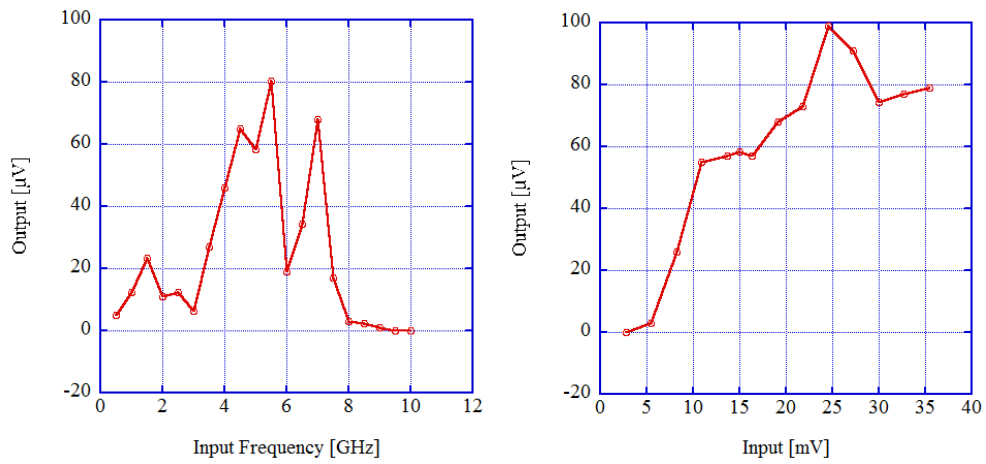


図9 チョッパーの出力振幅の周波数特性 図10 チョッパーの出力振幅の入力マイクロ波振幅依存性($f = 5\text{GHz}$)

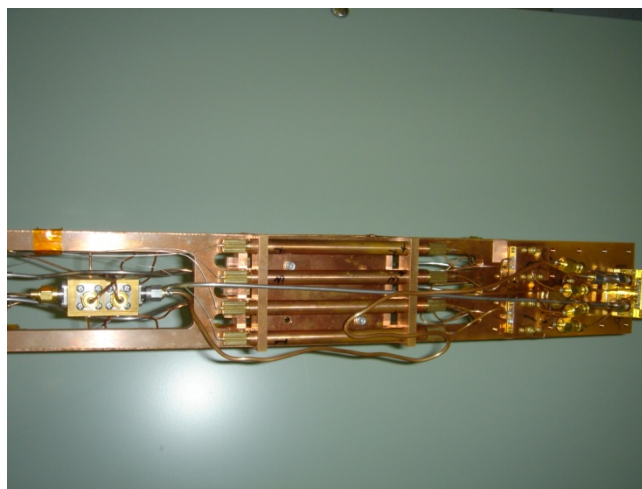


図11 希釈冷凍機におけるSFQ マイクロ波チョッパーと量子ビットとの接続

(2)研究成果の今後期待される効果

今回、初めて極低温での動作が可能な高速マイクロ波チョッパーを SFQ 回路を用いて実現し、その動作検証を行った。また、これらをモジュール化し超伝導量子ビットとの接続を可能とした。チョッパーのマイクロ波出力の立ち上がり時間は、数十 ps であり、出力振幅は約 100 μ V、消費電力は 9.6 μ W である。これにより、超伝導量子ビットの正確な状態制御が期待できる。今後は、本チョッパーを用いて超伝導量子ビットのラビ振動を観測し、本チョッパーの有効性を示していきたい。

3. 4 SFQによる量子ビットの高速、高精度観測(名古屋大学グループ)

(1)研究実施内容及び成果

将来の量子計算システムでは、複数の量子ビットの状態を量子ビット自身に擾乱を与えることなく高速で読み出すことが求められる。SFQ 回路は高速・低消費電力という特長をもち、本研究チーム(超電導工学研究所、横浜国立大学、名古屋大学)は、すでに大規模な集積回路を設計・製作する技術を持っていた。加えて SFQ 回路は、巨大な SQUID (量子干渉計)を形成しており、これを活用すると高感度の検出素子が構成できる。実際、

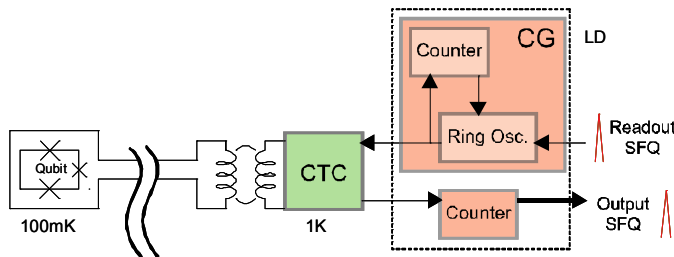


図1 SFQ読み出し回路の実装形態。CTCは電流-時間変換回路、LDは尤度判定回路を示し、いずれも1Kに設置されることを前提としている。量子ビットと読み出し回路間はコイルによって結合される。これによって読み出し回路が量子ビットの量子状態へ及ぼす悪影響は抑制される。

名古屋大学では、SFQ回路によるアナログ・デジタル変換器の実証に成功していた。このような背景の下、SFQ回路による読み出し回路に関する研究に着手した。対象とする量子ビットは、SFQ回路と結合しやすい磁束量子ビットを選択した。磁束量子ビットの状態読み出しには、本研究より以前は、量子ビットと直接結合もしくは磁気結合した直流 SQUID が用いられていた。しかしながら、読み出し回路が量子ビットに与える散逸を抑えるために、読み出し回路を構成するジョセフソン接合はラッチモード(一回電圧状態に遷移すると、その電圧が電流を下げるまで維持され続けるモード)でしか利用できず、結果として計測に際し大きな熱が発生し、再び量子ビットを動作点に戻すのに長い時間を要していた。したがって、発熱が抑制された高速読み出しが、読み出し回路には求められる。SFQ回路は、この要求を満たす最右翼の回路として、世界の幾つかの研究機関で研究が始められた。

上記のほか、読み出し回路には量子ビットの量子状態へ影響を与えないこと、読み出し操作が量子ビットに影響を及ぼすバックアクションを低減することが求められる。このほか、冷凍機の冷凍能力内に消費電力を抑えることも求められる。これらの要求事項をすべて満たす実装形態として、最終的には図1に示すような1KステージにSFQ回路を置き、量子ビットとの結合は低温と1Kステージのそれぞれで磁気結合する形を取った。なお、同図において CTC は電流-時間変換回路、LD は尤度判定回路を示す。1K に SFQ 回路を設置した結果、1K のジョンソン雑音によって、CTC の電流感度は一回の計測では 100nA 程度までしか低減できない。また、量子ビットと CTC 間のインダクタンス、あるいは量子ビットや CTC とコイルとの間の磁気結合によって、量子ビットの状態の違いによる電流の変化量が

100nA 以下となることも想定される。これを受け、読み出し回路としては、極限性能を目指すこと、さらには回路的な工夫により、実質的な電流感度の向上を目指すことが求められた。

CTC の具体的な回路ブロック図を図 2 に示す。原理は以下の通りである。読み出し用の SFQ 信号(図中では Readout SFQ と記載)を図の向きに送り出す。この SFQ は Splitter において、上下2つの経路に分離する。2 つに分かれた SFQ は遅延フリップフロップ (DFF) のクロック入力 (clk) とデータ入力 (din) にそれぞれ到達する。DFF は図 2 右側に記載した模式図のように、どちらの SFQ が先に到達したかを弁別し、出力を決定する。量子ビットの右回りの電流と左回りの状態は、SFQ の伝搬速度に影響を与える。図に示した左回りの電流の場合では、上の経路を通る SFQ は加速され、下の経路を通る SFQ は減速される。右回りの場合は、逆となる。CTC では上の経路と下の経路の長さをまったく同じとしており、DFF から SFQ が出力されるか否かで量子ビットの電流の向きが判定できる。CTC は上下の経路が対称となっている。また量子ビットと CTC 間のコイルのインダクタンスが大きいため時定数が長くなる。このことから、読み出し時の SFQ の伝搬に伴う電流の変化は量子ビット側にはまったく伝わらない。すなわち、読み出し操作が量子ビットの状態を乱すことは無視できるほど小さくなると考えられる。これが、本研究で提案した読み出し回路の最も大きな特長である。

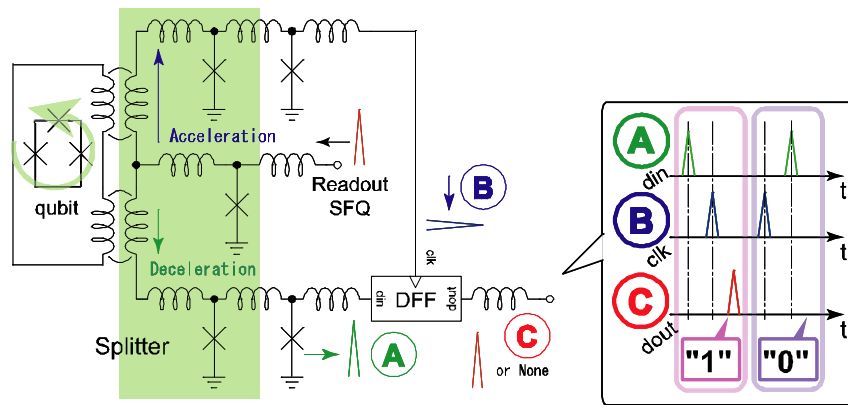


図 2 読み出し回路内の電流-時間変換回路 (CTC) のブロック図。DFF が上下2つの経路を伝搬してきた SFQ の到達順序を判定する時間弁別器として働く。出力は、右側のシーケンスによって表される。

前述のように、CTC は極限性能を追求する必要がある。DFF は雑音がない状態では、正確にSFQの到来時刻を弁別する能力を持っていることが数値計算から分かっている。しかしながら、実際の CTC にはジョンソン雑音や量子雑音、外来雑音などがあり、時間のぶれが発生する。このぶれはジッタの形で観測できることから、ジョセフソン接合自身の時間ジッタ、時間弁別器の鍵を握るジョセフソン接合2つを直列にした比較器構造の時間ジッタを計測した。図 3 は、ジッタ計測に用いた SFQ 回路の原理図である。図中の矢印(Injection current の部分を除く)は、SFQ の能動伝送線であるジョセフソン伝送線路(JTL)を表している。 τ は時間遅延であり、ここでは時間ジッタがない受動線路を用いている。ジッタは τ を基準として計測される。4つの DFF のクロック入力には、上から下に向けそれぞれ τ だけ時間が遅れて、クロック入力される。一方データ入力につながっている JTL はツリー状の構成となっており、4つの DFF に同時にデータが入力される。

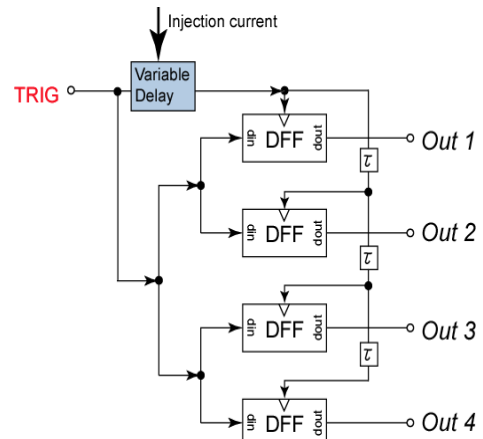


図 3 ジッタ測定SFQ回路のブロック図

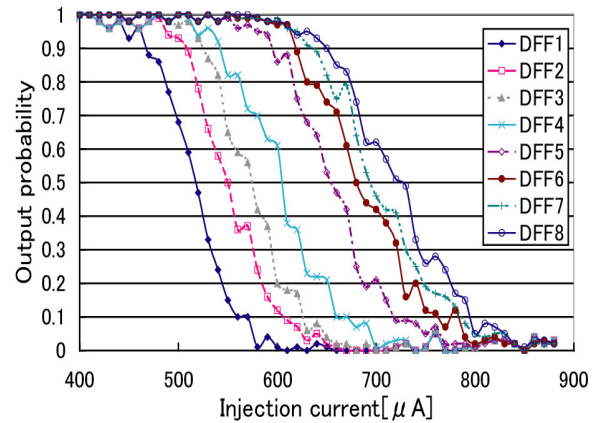


図 4 DFF が 8 個の場合のジッタ測定回路の計測例。雑音により、DFF の遷移は確率的な部分(グレーゾーン)が存在するようになる。横軸の電流は遅延時間 τ により時間軸へ変換されて理解される。

図 4 は DFF が 8 個の場合の測定結果例である。縦軸の出力確率の値を得るために、3900 回の平均を取っている。横軸は、図 3 中の Injection current に対応し、クロック入力側のみ遅延時間を変化させる効果を持つ。DFF1の遷移カーブの midpoint(確率が 0.5 となる点)と DFF8 のそれとの間隔が τ の 7 倍に相当すると考え、横軸を時間に変換する。

実際の回路では JTL を構成するジョセフソン接合の個数の異なるものを、同じ DFF を用いて測定できるようにした。これによってジッタのジョセフソン接合数依存性を調べることができる。図 5 が 4K での測定結果である。試料は 4 個別々のチップを測定した。図中実線は理論曲線にフィッティングさせた結果である。この結果から、ジョセフソン接合 1 個当たりのジッタは 65fs と算出された。ただし、ここで用いているジョセフソン接合には、通常の SFQ 回路で用いるのと同じ抵抗値のシャント抵抗(R_s)が並列に加えられている。

ジッタの原因を探るため、ジッタの温

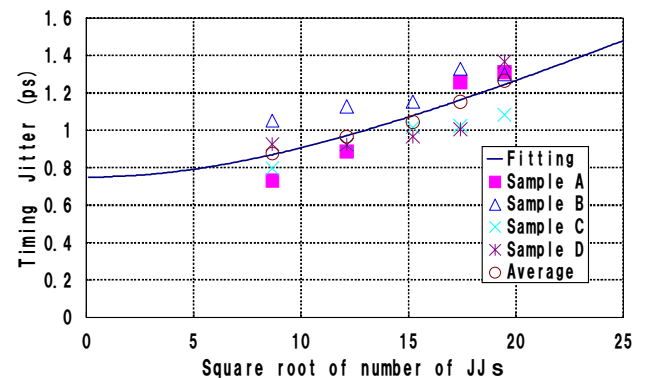


図 5 シャント抵抗付きジョセフソン接合による JTL のジッタの接合数依存性

度依存性とシャント抵抗値依存性を実験的に調査した。ジョセフソン接合のジッタは、温度を T として、3.2K から 5.4K の範囲であれば \sqrt{T} に比例したほか、 $\sqrt{R_s}$ に反比例した。この実験結果は、単独ジョセフソン接合のジッタの主因が、シャント抵抗(ジョセフソン接合の準粒子抵抗も含む)によるジョンソン雑音であることを意味している。なお、最終的にはシャント抵抗を設置しないジョセフソン接合において、14fs のジッタを得ている。

一方、図 5 の Y 切片は JTL のジョセフソン接合数に依存せず、同じ値を示している。このことは、この CTC には JTL のジョセフソン接合とは別にジッタの原因があることを示している。

もっとも疑わしいのは DFF 内にある比較器構造である。そこで、図 6 のように単純な JTL のジョセフソン接合の代わりに比較器を用いた JTL を採用し、そのジッタを計測した。ここでのジョセフソン接合にはシャント抵抗を付けた。図 7 に 4 個のチップに対する測定結果を示す。なお、図中の横軸のジョセフソン接合の数は、接地されている接合の数となっている。また、図中実線は、比較のために通常の JTL のジッタを示した。図から分かるように、比較器のジッタは大きくばらついており、通常の JTL の 2 倍から 7 倍となっている。ひとつの比較器のジッタを計算すると、最小値は 130fs、平均値は 365 fs となった。最小値で考えても、ジッタは 1 個の接合当たり通常のシャント抵抗を付けた単独接合に比べ $\sqrt{2}$ 倍程度大きくなっている。

この比較器のジッタの原因を調べるため、温度依存性と回路パラメータ依存性を調べた。温度に関しては、3.2K から 5.4K の範囲では、明確なジッタの変化は観測されなかった。エスケープ接合(接地面から離れたジョセフソン接合)のシャント抵抗を大きくした場合は、ジッタの平均値には明確な変化は観測されなかったが、ばらつきの範囲が広がった。一方、エスケープ接合の臨界電流値を大きくした場合は、ばらつきの低下が確認された。これらの一連の結果は、臨界電流を大きくして負荷を大きくするとばらつきが低減し、シャント抵抗を高くして負荷を軽くするとばらつきが小さくなることを示している。これは、比較器のジッタの原因が、比較器自身の動的不安定性に由来していることを示唆している。負荷を大きくすることは、比較器自身の動作速度を低下させることを意味することから、比較器の回路パラメータには最適値が存在する。现阶段では、最適なパラメータを得るにはいたっていないが、最適化によって、比較器のジッタは単独の接合のジッタに近づくと考えられる。すなわち、最終的にはジョンソン雑音が CTC の電流感度を決定するものと考えている。

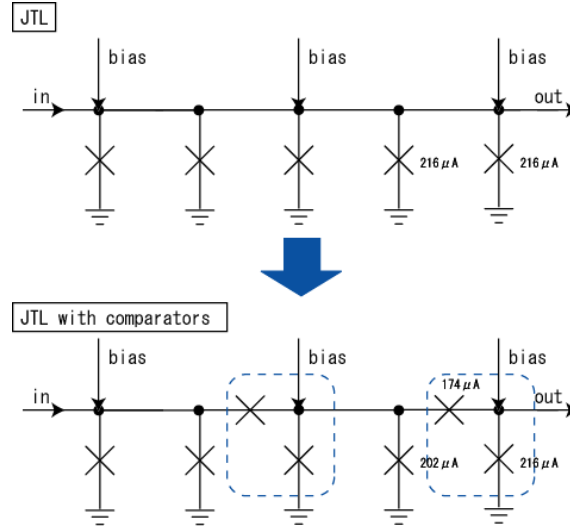


図 6 ジッタ測定回路に用いた JTL と比較器を挿入した JTL の等価回路

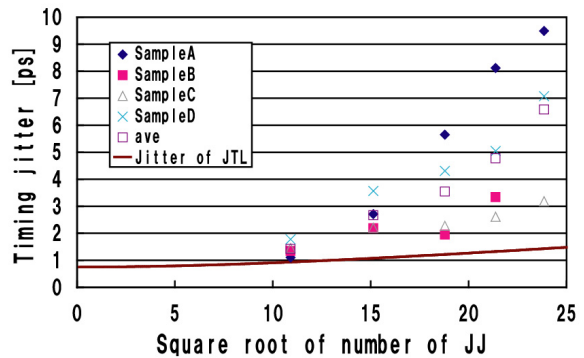


図 7 ジッタの比較器数依存性

以上のジッタ計測の実験ののち、CTC の電流感度の測定を試みた。当初得られた電流感度は $35\mu\text{A}$ と非常に大きいものであったが、その後感度低下をもたらす原因を一つ一つ取り除く作業を進めた。図 8 は、最終的な CTC にいたる改善点を模式的に示したものである。図 9 に、SRL 標準プロセスによって実際に作製した CTC の顕微鏡写真を示す。

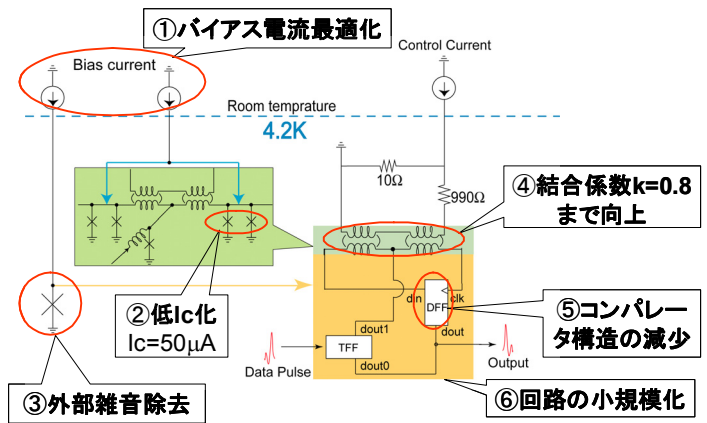


図 8 CTC の最終形態にいたる改善点。Control current が外部から供給され、被測定電流となる。

図 10 は、これまで得られた中でもっとも良い電流感度を示した測定結果例である。測定温度は 4K である。図から分かるように、出力確率の遷移幅は $0.8\mu\text{A}$ となっており、これがそのまま電流感度とみなされる。一般的な CTC では概ね $2\text{--}4\mu\text{A}$ が得られた。この電流感度の値は比較器のジッタにほぼ対応することが、数値計算から分かっている。すなわち、電流感度のばらつきは、前述した比較器のジッタのばらつきをそのまま反映している。したがって、比較器の回路パラメータの最適化が行われれば、限界性能に近づく $1\mu\text{A}$ 以下の電流感度が安定して得られる

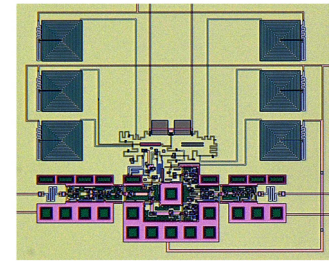


図 9 作製した CTC の顕微鏡写真

ものと考えている。

4K で $0.8\mu\text{A}$ の電流感度は、CTC を 1K ステージに置くことで半分の 400nA まで低下させることが期待できる。しかしながら、依然として目標とする 100nA 以下の電流感度には届かない。そこで、デジタル無線通信で用いられる尤度判定法を導入することを考えた。これは、多数決によって出力が 1 か 0 を判断するものである。幸い、磁束量子ビットのデコヒーレンス時間 (T_2) は非常に長い。一方、SFQ 回路は数十 GHz で動作させることができる。また、前述のように、この方式では読み出し回路から量子ビットへのバックアクションはほとんどない。以上の理由により、尤度判定を導入しても十分に単一回読み出しが実現できると考えた。数値解析によると、 N 回の試行の尤度判定によって、概ね電流感度は $1/\sqrt{N}$ 倍に低減化できる。

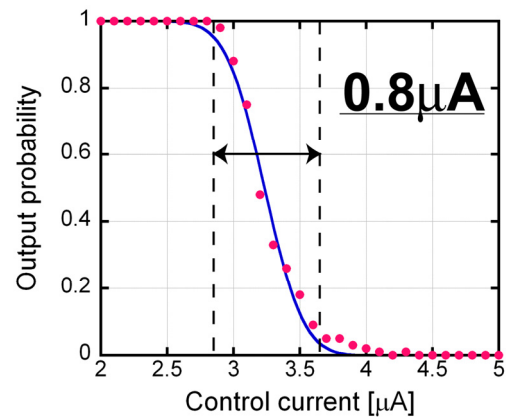


図 10 最高感度を記録した最終形態の CTC の測定結果

図 1 に示すように、尤度判定回路はクロック信号発生器 (CG) とカウンタ (Counter) から構成される。CG によって、設定された数 N だけ Readout SFQ が CTC に送り込まれる。一方、尤度判定回路 (LD) の下方に書かれた Counter では、 $N/2$ よりも大きければ SFQ 出力を出し、小さければ出力しないようになっている。

図 11 が尤度判定回路による電流感度の測定結果である。この実験では、 $N=1$ の場合と

$N=255$ の場合を調べられるように設計した。 $N=1$ の場合は言うまでもなく、尤度判定回路を用いない場合に相当する。図から分かるように出力確率の遷移幅(図中 gray zone と記載)は、 $N=1$ の場合は $7.5\mu\text{A}$ 、 $N=255$ の場合は 500nA であった。約 $1/15$ に低下しており、ほぼ数値計算どおりの効果が実証された。なお、同図中、 $N=255$ の場合に現れる2つのピークは、デジタル回路の設計ミスによるもので、本質的な意味は持たない。

現在でも比較器のジッタが小さい場合は 4K で 800nA の電流感度が得られている。これに 255 回の試行による尤度判定を施せば、 30nA 程度の電流感度が得られる計算となる。さらに 1K まで温度を低下させることで計算上は 15nA の電流感度が達成される。したがって、本研究によって最終目標の電流感度を得る十分な証拠を得るに至ったと考えている。今後は、比較器のジッタを低く抑える回路パラメータの最適化と、必要に応じ試行回数を増加することが求められる。最終的には 10nA を切る電流感度も見込め、単一回読み出しは図 1 に示した形態で可能と判断している。

他の機関との比較を考えてみる。SFQ 回路を主に磁束量子ビットの読み出しに適用しようという試みは欧米の幾つかの研究機関で実施されている。ただし、現時点まで実際に SFQ 回路で量子ビットの状態を完全に読み出したと言う報告はなく、多くは基礎的な検討に留まっている。すべての提案は読み出し回路が対称形とはなっておらず、バックアクションの可能性を否定できない。電流感度を実際に測定した例としては Rochester 大学のグループが挙げられる。本研究の提案より単純な構造であるが、 4K での電流感度は $10\mu\text{A}$ となっている。このように、本研究の提案の回路構造は、非常に特徴的であり、電流感度も優れていると判断している。

提案時には想定していなかったが、図 1 のような構成をとることが決まったことから、量子ビットと SFQ 読み出し回路間を断熱低インダクタンスで結合する実装技術も手掛けた。具体的には、ポリイミドフォイルの上に超伝導 Nb 膜を堆積し、それをコブレナ線路形状に微細加工した。超伝導体を用いることで断熱を、直線上のコブレナ線路によって低インダクタンスを実現している。この超伝導線とチップの間は SU8 という MEMS 用のフォトレジストを用いることで、ボンディングをすることなく直接 Nb による配線へと繋がる。現時点では、超伝導コンタクトが確認されているだけで、実際の特性を調べるに至っていないが、今後重要になる技術と考えている。図 12 にこの配線の様子を撮影した写真を載せる。

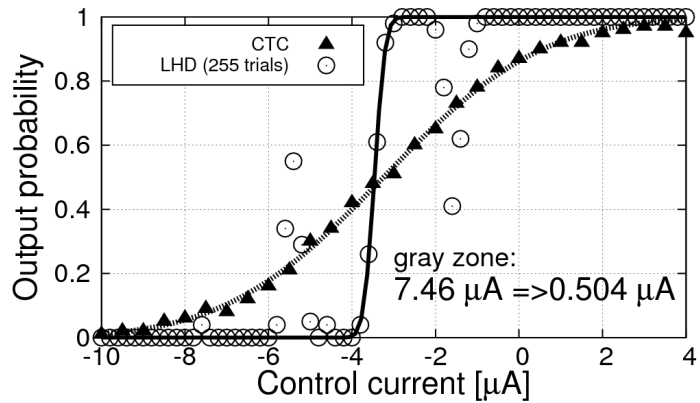


図 11 尤度判定回路による CTC の電流感度の変化。実験は $N=1$ と $N=255$ の 2 つの場合に対し行った。

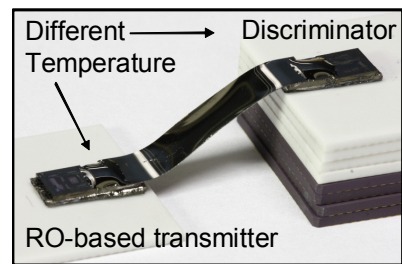


図 12 SU8 を用いた Nb コブレナ線とチップの結合。断熱と低インダクタンス結線を実現している。

(2)研究成果の今後期待される効果

前述のように、量子ビットの単一回読み出しに向けては、まず比較器のジッタの低減のための回路パラメータの最適化が急務である。こののちはまずは1量子ビットの状態の観測を行うことが妥当である。その際には、読み出し回路には尤度判定回路を用いずに、代わりに量子ビットと同じ温度に読み出し回路を設置する。同時に、実装技術を発展させ、その技術を用い最終的な形態での量子ビットの状態観測を追求する。

この技術は、量子ビットの状態観測のみならず、高感度電流計測という意味で一般化できる。最も身近な例では、超伝導転移端センサ (TES) に代表される高エネルギー分解能超伝導検出器の読み出しに簡単に応用できる。TES は、X 線、 γ 線などの放射線の入射によって電気抵抗が大きく変化する素子である。現在は抵抗変化を電流変化に変換し、それを SQUID によって検出しているが、この SQUID をそのまま、本研究の回路に置き換えることが可能である。本研究の回路は出力がデジタル化されているため、TES を多く並列化した場合などに、非常に有効である。実際、検出器と SFQ 多重化技術の組み合わせは注目されており、本研究分担者・藤巻は JST 先端計測プログラムによって平成 20 年度 10 月から多重化技術を中心に据えた小型中性子回折装置の開発を手掛けるに至っている。この例に限らず、高感度電流計測は広く要望されており計測の観点から本研究で得た成果は社会に還元できるものと考えている。

3. 5 量子情報処理の物理的実現のための理論的研究(理研グループ)

(1)研究実施内容及び成果

In the past two years, we theoretically proposed and analyzed:

Controllable-coupling schemes for SC qubits, including:

- Switchable coupling for superconducting qubits using double resonance (PRB 2006, PRB 2007).
- Switchable coupling between charge and flux qubits (PRB 2007)
- Improving parametric inter-qubit coupling (PRB 2008)
- Scaling of errors in many-qubit circuits (PRB 2008)
- Spectroscopy of superconducting charge qubits coupled by a Josephson inductance (PRB 2008)
- One-step generation of multi-qubit entangled states (cond-mat 2008, NJP, in press)
- Simulating quantum spin glasses using SC qubits (cond-mat 2008, NJP, in press)
- Coupling a superconducting (SC) JJ qubit to a QED cavity (in 2001, 2003) and studied it for generating squeezed states (2004, 2005) and as a micromaser (cond-mat 2005, PRB 2007). Lasing in SC resonators (cond-mat 2008)

In addition, we also theoretically proposed and analyzed:

- Generating and using cluster and entangled states for QC in solid-state qubits (PRL 2006, PRA 2007, PRA 2008)
- Robust quantum gates using rapid adiabatic passage (PRL 2008)
- Cooling qubits and their neighboring components (PRB 2007, PRB 2008, PRL 2008)
- Probing and using Two-Level System (TLS) defects in JJs as qubits (PRL 2006, NJP 2006). Now being studied experimentally (e.g., UCSB, Maryland, LPS, Delft).
- Dynamics of a strongly-driven qubit (PRA 2007)
- Quantum versus classical oscillations in SC qubits (NJP 2008)

- Quantum meta-materials: Electromagnetic waves in a Josephson qubit line (PRB 2008)
- A low-decoherence qubit that uses a large shunt-capacitor in parallel with a JJ qubit (cond-mat 2004 & 2006, PRB 2006 & 2007). This idea can be applied to flux or charge qubits.

Abbreviations: PRL = Physical review Letters; PRB = Physical review B; NJP = New Journal of Physics.

Self-evaluation:

Our team is considered to be among the top teams in the world in the areas of superconducting qubits (and vortex dynamics in superconductors, among other related topics). Our results have been repeatedly published in top physics journals, receiving numerous very positive referee reports.

More detailed description of a few of the obtained results.

Since there are many results, let me choose a few below, and expand on these selected ones, instead of listing too many. Let us first start with an example of a collaboration between theorists and experimentalists in both teams.

S. Ashhab, A.O. Niskanen, K. Harrabi, Y. Nakamura, T. Picot, P.C. de Groot, C.J.P.M. Harmans, J.E. Mooij, F. Nori
Interqubit coupling mediated by a high-excitation-energy quantum object
 Phys. Rev. B 77, 014510 (2008)

This is a significant piece of work. In this paper, we consider a system composed of two qubits and a high excitation energy quantum object used to mediate coupling between the qubits. We treat the entire system quantum mechanically and analyze the properties of the eigenvalues and eigenstates of the total Hamiltonian. After reproducing well-known results concerning the leading term in the mediated coupling, we obtain an expression for the residual coupling between the qubits in the off state. We also analyze the entanglement between the three objects, i.e., the two qubits and the coupler, in the eigenstates of the total Hamiltonian. Although we focus on the application of our results to the recently realized parametric-coupling scheme with two qubits, we also discuss extensions of our results to harmonic-oscillator couplers, couplers that are near resonance with the qubits and multiqubit systems. In particular, we find that certain errors that are absent for a two-qubit system arise when dealing with multiqubit systems.

Another example of a very fruitful collaboration between the theory and experimental teams is presented in this (also very recent) paper:

T. Yamamoto, M. Watanabe, J.Q. You, Yu.A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, F. Nori, J.S. Tsai
Spectroscopy of superconducting charge qubits coupled by a Josephson inductance
 Phys. Rev. B 77, 064505 (2008)

In this work, we have designed and experimentally implemented a circuit of inductively coupled superconducting charge qubits, where a Josephson junction is used as an inductance, and the coupling between the qubits is controlled by an applied magnetic flux. Spectroscopic measurements on the circuit are in good

agreement with theoretical calculations. We observed anti-crossings which originate from the coupling between the qubit and the plasma mode of the Josephson junction. Moreover, the size of the anti-crossing depends on the external magnetic flux, which demonstrates the controllability of the coupling.

Another example of the excellent collaborative effort between RIKEN and NEC is presented in this work:

Y.X. Liu, L.F. Wei, J.R. Johansson, J.S. Tsai, F. Nori
Superconducting qubits can be coupled and addressed as trapped ions
Phys. Rev. B 76, 144518 (2007)

Exploiting the intrinsic *nonlinearity* of superconducting Josephson junctions, we propose a scalable circuit with superconducting qubits (SCQs) which is very similar to the successful one now being used for trapped ions. The SCQs are coupled to the “vibrational” mode provided by a superconducting LC circuit or its equivalent (e.g., a superconducting quantum interference device). Both single-qubit rotations and qubit-LC-circuit couplings and/or decouplings can be controlled by the *frequencies* of the time-dependent magnetic fluxes. The circuit is scalable since the qubit-qubit interactions, mediated by the LC circuit, can be selectively performed, and the information transfer can be realized in a controllable way

Another significant result, obtained under this CREST program, is the following:

Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori
Scalable superconducting qubit circuits using dressed states
Phys. Rev. A 74, 052321 (2006)

We study a coupling (decoupling) method between a superconducting qubit and a data bus that uses a controllable time-dependent electromagnetic field (TDEF). As in recent experiments, the data bus can be either an LC circuit or a cavity field. When the qubit and the data bus are initially fabricated, their detuning should be made far larger than their coupling constant, so these can be treated as two independent subsystems. However, if a TDEF is applied to the qubit, then a “dressed qubit” (i.e., qubit plus the electromagnetic field) can be formed. By choosing appropriate parameters for the TDEF, the dressed qubit can be coupled to the data bus and, thus, the qubit and the data bus can exchange information with the assistance of the TDEF. This mechanism allows the scalability of the circuit to many qubits. With the help of the TDEF, any two qubits can be selectively coupled to (and decoupled from) a common data bus. Therefore, quantum information can be transferred from one qubit to another.

Even though the paper mentioned right above is a theoretical paper, it has been prominently cited by an experimental paper by the group of Per Delsing, who found our theoretical work to be significant for their experiment.

The following paper, right below, has been described by several people to be “a classic”. It is deep, thoughtful, very well-written, and provides clear results in the field of quantum heat engines and quantum thermodynamics:

H.T. Quan, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori
Quantum thermodynamic cycles and quantum heat engines
Phys. Rev. E 76, 031105 (2006)

In order to describe quantum heat engines, here we systematically study isothermal and isochoric processes for quantum thermodynamic cycles. Based on these results the quantum versions of both the Carnot heat engine and the Otto heat engine are defined without ambiguities. We also study the properties of quantum Carnot and Otto heat engines in comparison with their classical counterparts. Relations and mappings between these two quantum heat engines are also investigated by considering their respective quantum thermodynamic processes. In addition, we discuss the role of Maxwell's demon in quantum thermodynamic cycles. We find that there is no violation of the second law, even in the existence of such a demon, when the demon is included correctly as part of the working substance of the heat engine.

This is the extended version of the following summary paper:

H.T. Quan, Y.D. Wang, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori
Maxwell's demon assisted thermodynamic cycle in superconducting quantum circuits
Phys. Rev. Lett. 97, 180402 (2006)

This work also relates to this one:

K. Maruyama, F. Nori, V. Vedral
Physics of Maxwell's demon and information
Rev. Mod. Phys., in press (2008)

Cluster states are promising in quantum optics, where measurements are fast, and less promising in solid-state qubits, where measurements are slow (for the time being, but these could become fast in the future, so better study these). We have several results along this direction. These are:

T. Tanamoto, Y.X. Liu, S. Fujita, X. Hu, F. Nori
Producing cluster states in charge qubits and flux qubits
Phys. Rev. Lett. 97, 230501 (2006)

We propose a method to efficiently generate cluster states in charge qubits, both semiconducting and superconducting, as well as flux qubits. We show that highly entangled cluster states can be realized by a "one-touch" entanglement operation by tuning gate bias voltages for charge qubits. We also investigate the robustness of these cluster states for nonuniform qubits, which are unavoidable in solid-state systems. We find that quantum computation based on cluster states is a promising approach for solid-state qubits.

J.Q. You, X.-B. Wang, T. Tanamoto, F. Nori
Efficient one-step generation of large cluster states with solid-state circuits
Phys. Rev. A 75, 052319 (2007)

Highly entangled states called cluster states are a universal resource for measurement-based quantum computing (QC). Here we propose an efficient method for producing large cluster states using superconducting quantum circuits. We show that a large cluster state can be efficiently generated in just one step by turning on the interqubit coupling for a short time. Because the interqubit coupling is only switched on during the time interval for generating the cluster state, our approach is also convenient for preparing the initial state for each qubit and for implementing one-way QC via single-qubit measurements. Moreover, the cluster state is robust against parameter variations.

X.-B. Wang, J.Q. You, F. Nori
Quantum entanglement via two-qubit quantum Zeno dynamics
Phys. Rev. A 77, 062339 (2008)

We study the two-particle quantum Zeno dynamics with a type of nondeterministic collective measurement whose outcome indicates whether the two-particle state has been collapsed to $|11\rangle$. Such a threshold detection, when used continuously, can lead to nontrivial quantum dynamics. We show that such type of dynamics can be used to produce quantum entanglement almost deterministically. We then numerically show the robustness of the method and we find that the operational errors of the small-angle rotations do not accumulate. We also propose a possible implementation using superconducting flux qubits.

Recent exciting results obtained by our team also include the following:

J.Q. You, Y.X. Liu, F. Nori
Simultaneous cooling of an artificial atom and its neighboring quantum system
Phys. Rev. Lett. 100, 047001 (2008)

M. Grajcar, S. Ashhab, J.R. Johansson, F. Nori
Lower limit on the achievable temperature in resonator-based sideband cooling
Phys. Rev. B 78, 035406 (2008)

L.F. Wei, J.R. Johansson, L.X. Cen, S. Ashhab, F. Nori
Controllable coherent population transfers in superconducting qubits for quantum computing
Phys. Rev. Lett. 100, 113601 (2008)

This team has also obtained many other results, in other related problems on superconducting qubits. These can be easily accessed anytime, online at dml.riken.jp, where PDF files of all of our papers are readily available.

(2)研究成果の今後期待される効果

We plan to continue these studies, including:

- Proposing and studying controllable coupling schemes for scalable circuits using SC JJ qubits.
- Studying various properties of scalable circuit proposals (e.g., Rabi oscillations, entanglement, cluster states, coupling with QED cavities, lasing, tomography, and decoherence).

3. 6 量子ビット用SFQ設計・実験、超伝導可逆回路(ニューヨーク州立大学)

(1)研究実施内容及び成果

We have showed previously that reversible nSQUID circuits can in principle operate in both classical and quantum modes. Here we present the first circuit that is fully operational classically. The circuit contains two shift registers (i.e., cells that transfer the input data to the outputs) with a common clock ring. We estimate that the dissipated power is within factor of two or three of the thermodynamic threshold of $k_B T \ln 2$ per switching. We also present new arguments that after a proper scaling nSQUID circuits could operate in the quantum mode. In this case the unique advantage of nSQUID circuits is their ability to transfer quantum data freely along the

chip and therefore form complex multi-qubit circuits bypassing the problem of controllable couplers.

The first realistic reversible classical circuits nSQUIDs, i.e., dc SQUIDs with negative mutual inductance between the arms of the SQUID loop, were introduced four years ago at ASC 2004 [1] and were further improved at ASC 2006 [2]. The two main goals of our nSQUID effort were to demonstrate reversible medium-scale computations in the classical regime, and to suggest an alternative approach to quantum computation (QC) with superconducting qubits. The principal advantages of the nSQUID circuits in the QC context originate from the two circumstances. (1) These circuits do not require controllable keys to switch on and off the interaction between the qubits. Such keys are critically important for other types of superconducting qubits in order to organize them into larger QC structures. (2) The quantum (qubits) and classical (support) parts of the nSQUID circuits can be naturally integrated into uniform and scalable in the practical sense structure. We believe that the suggested approach or at least its main ideas will prove very useful for the further development of superconducting quantum circuits in the near future.

The other aspect of the nSQUID circuits is that they can be usefully operated in the classical mode [1]. In this capacity, they are positioned as the digital circuits with extremely low energy dissipation that can approach or even cross the important thermodynamic threshold $k_B T \ln 2$ per logic operation. This energy dissipation is about 4 orders of magnitude smaller than the energy dissipation in RSFQ circuits.

Below we remind the readers the basic principal of their operation, present and discuss the results of measurement of the first fully operational classical circuits. Then we return to a discussion of their advantages for prospective QC applications.

Comparison of RSFQ and nSQUID circuits

As was already mentioned in the introduction, nSQUID circuits dissipate dramatically less power than their RSFQ counterparts. To see this, one can look at a “primitive” RSFQ cell shown in Fig. 1: two similar pieces of Josephson Transmission Lines (JTLs) that transfer the SFQ pulses (or vortices) which represent clock and data signals from JTL inputs to their outputs. Josephson junctions in JTLs are critically damped by shunt resistors and relatively large bias currents are applied to the junctions to compensate for the viscous friction between vortices and shunt resistors. The bias currents for many junctions are delivered via a single power line and are distributed between the junctions using the corresponding bias resistors R_b . Unfortunately most of the energy is dissipated in those bias resistors rather than in the “active” circuitry. This drawback is caused by the two factors. First, the required bias voltage V_b is too low to keep it constant by means of semiconductor electronics. As a result, a constant current rather than voltage is provided by the power source. The second factor is the Josephson voltage-to-frequency relationship which means that the average voltage across the JTL (shown as V_j in Fig. 1) fluctuates following the variable rate of data vortices. As a result, the distribution of the total bias current between the clock and data lines depends on the data pattern. This parasitic effect is reduced to an acceptable level if the effective value of bias voltage is dramatically higher than the variations of the voltage V_j .

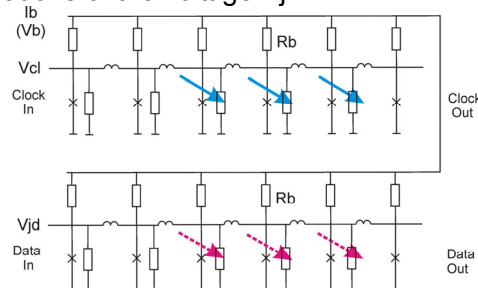


Fig. 1. Data flow in a typical RSFQ cell (Clock and Data JTLs)

A string of nSQUIDs (Fig. 2) is similar to a JTL but with Josephson junctions replaced by nSQUIDs (Fig. 2a, b). Each nSQUID [1, 2] is a 2-junction SQUID with a negative mutual inductance between its inductive arms. This negative mutual inductance resolves the two conflicting requirements for the “two degrees of freedom” of the system [1, 2]. In a common mode, one would like to keep the low effective inductance ($\beta_i \sim 0.2$) and therefore a simple dynamics of this mode (with current flow via the Clock line). For the differential current circulating along the SQUID arms, one needs to provide a larger effective inductance ($\beta_i \sim 1.4$) so that there are two stable state possible in this degree of freedom.

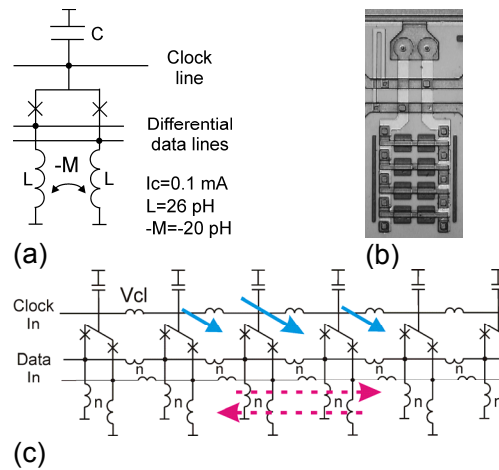


Fig. 2. Data flow in a string of nSQUIDs.

The low ($\beta_i < 1$) inductance for the common mode means that properties of vortices moving along the string are close to the well-known properties of vortices in the long Josephson junctions. The main difference between the two situations is that the nSQUIDs located near the current centers of the moving vortices experience approximately $\Phi_0 / 2$ or π magnetic (clock) bias and therefore find themselves in one of the two stable states that can be distinguished by the sign of the current circulating along the nSQUID [1, 2]. As shown in Fig. 2c, the nearest-neighbor nSQUIDs are magnetically coupled and, as a result, all nSQUIDs belonging to one vortex share the same logic state. This state can be naturally used to carry one bit (“0” and “1”) of logic (digital) data.

The described new data presentation has two advantages. First, average voltage on clock line V_{cl} is proportional to the frequency of clock vortices and does not depend on data pattern. This independence of the data flow should allow to dramatically reduce the bias resistors and the bias voltage, if biasing scheme shown in Fig. 1 is used. However, as we will show later, the total bias current is so low that it could be applied directly to the clock line.

Second, the data domain is automatically “synchronized” with the clock vortex. This means that a relative time jitter between the clock and the data is essentially suppressed. This, in turn allows to reduce the critical currents of the Josephson junctions. Finally, the dynamics of the circuit is quite simple. In fact, it is nothing more than a motion with a constant speed of a clock vortex coupled with data domain. In this case, the shunt resistors can be completely eliminated.

In circuit shown in Fig. 2 we eliminated the dissipation of energy in the bias resistors by replacing it with a bias capacitor. However, there is still a considerable energy flow

associated with clock vortices. This energy is not necessarily dissipated. The vortices and therefore their energy could be “recycled”, for example, in circuit containing two shift registers with clock lines connected to provide a ring (Fig. 3). Ideally, without dissipation in Josephson junctions, such circuit should not dissipate any energy at all.

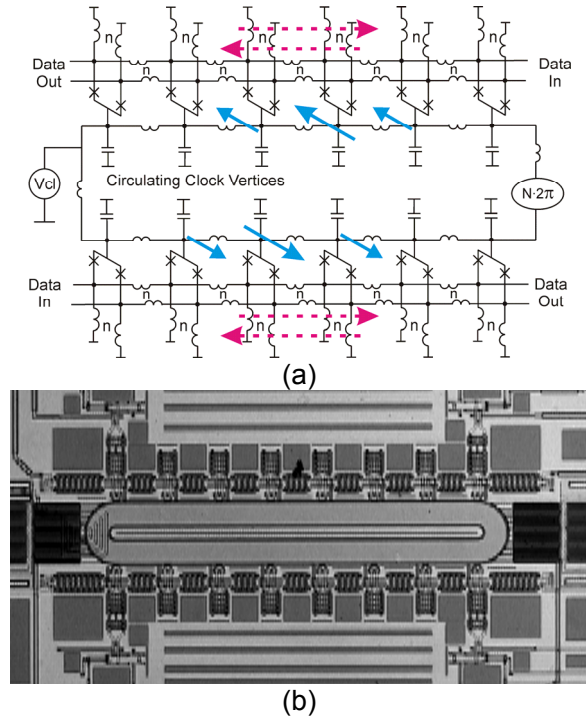


Fig. 3. Equivalent circuit (a) and microphotograph (b) of two shift registers with a common clock ring. Length of one cell 170 μm , length of the ring is about 1.4 mm. Only 6 of 8 cells are shown on the equivalent circuit.

However, this is not true in a real life. Let us first discuss how energy is dissipated in a Josephson junction. An unshunted Josephson junction usually has a sufficiently large capacitance C to keep voltage drop at a constant value. As a result current flowing via the junction is purely harmonic:

$$I_j = I_c \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

with zero average value. However, hysteresis of I-V curve makes it difficult to maintain this mode of operation at relatively low, say around 1 GHz, value of f . The problem is eliminated, if we use an external voltage source with a low internal impedance and controllable output voltage V_{cl} . In the simplest case it could be a small resistor R_v biased by current I_v (left side in Fig. 4). We think it is absolutely “legal” to exclude the dissipation in the voltage source from our energy balance.

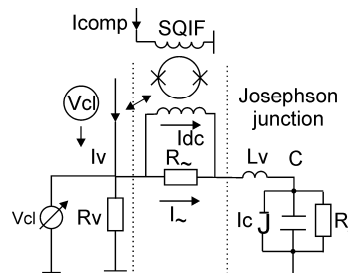


Fig.4. Setup for the measurement of energy dissipated in unshunted Josephson junctions.

Above we discussed regular (infinite) string of nSQUIDs. Of course short strings should be properly terminated, for example, by cells shown in Fig. 5a. The cell fulfils two functions. A SQUID shown in the lower part of the cell allows to measure differential magnetic flux (or logic data) stored in the corresponding nSQUID. In fact, these two SQUIDs are coupled rather weakly ($k \sim 0.02$) to avoid their undesirable interaction. But at the same time this coupling is sufficient for our purposes due to high sensitivity of the readout SQUID (see Fig. 5b).

The data could be written by applying a differential dc magnetic bias created by current lin. Let us remind one more time that we should write data on one edge of the shift register and measure data on its other edge. Figure 8 shows typical results of such measurements.

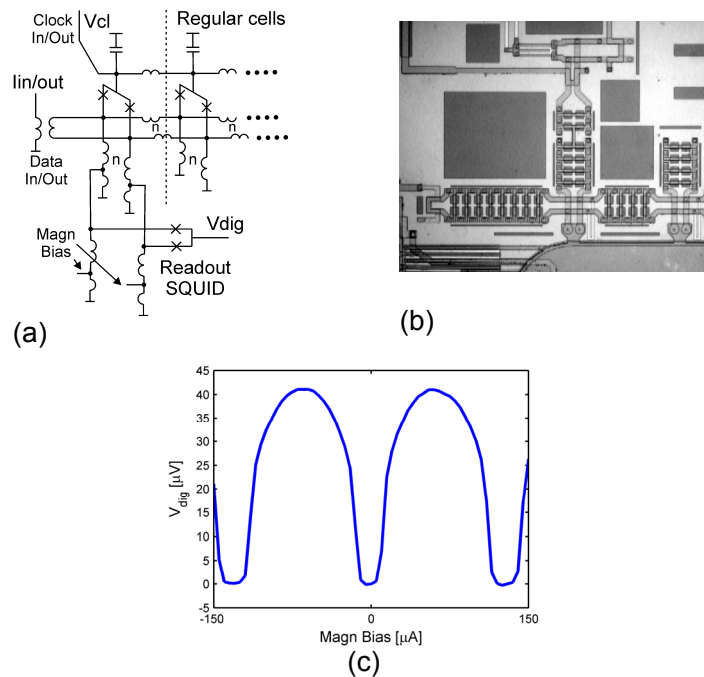


Fig. 5. Universal Write/Read circuit that terminate both edges of both shift register. (Vertically flip either picture or equivalent circuit.)

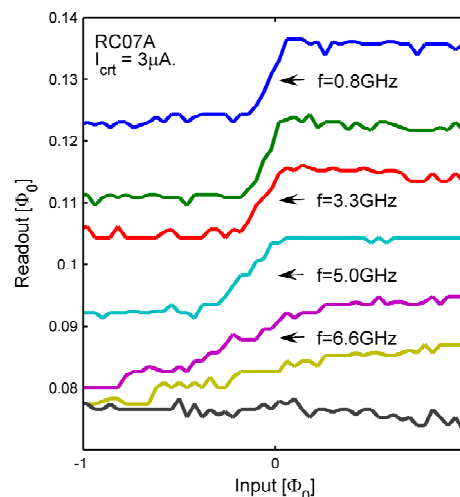


Fig. 6. Digitization and propagation of the digitized data along the shift register. Analog input magnetic flux (Analog Input) is created by current lin, Digitized output is extracted from Readout SQUID (for notations see Fig. 5a).

It is easy to see digitization effect: at lower values of analog input signal the digital output shows constant (digital) output corresponding a negative differential state (logical “0”), while at higher input signal the differential state is positive (logical “1”). This calculation result is rather simple. It involves 3 primitive functions: writing data into a shift register, propagation of these data on about 2 mm distance and reading them. But the novel feature of this demonstration is extremely low energy dissipation. We already discuss the measurement procedure (see, Fig.4 and related text). Figure 7 shows one of measured dependences of I_{dc} on I_v . It is easy to see that until I_v is below the critical current of our circuit all bias current flows via the circuit. However, after I_v crosses its critical value (about 4 μA) current I_{dc} decreases. For comparison (dashed lines) we shown this dependence for the simple model discussed earlier. Unfortunately the curves fit each other rather poorly. This is because of parasitic coupling between current I_v and the SQIF. As a result, at the moment we can make only estimation for the dissipated energy.

As we discussed earlier, the main dissipation sources are sub-gap resistances of unshunted Josephson junctions in nSQUIDs. Total critical current of junctions in one shift register is about 0.16 mA that being combined with reported by HYPRES subgap voltage about 70 mV gives about 420 Ohm resistance. Current via this resistance is proportional to applied voltage and therefore the operation frequency (Fig. 7). It reminds below the thermodynamic threshold at frequencies below 4 GHz. The energy of Josephson generation dissipated mostly in voltage source resistance R_v that should be detected by SQIF as we discussed earlier is reduced with frequency. But it looks that within 0.4 GHz and 4 GHz frequency range our circuit should demonstrate the dissipation of energy below the thermodynamic threshold. Unfortunately these figures are still not supported experimentally and we would like to modestly state that the dissipated energy might be close to the thermodynamic threshold.

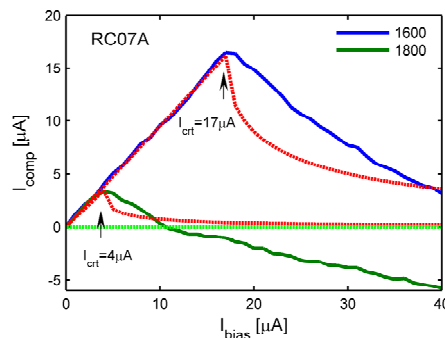


Fig. 7. Measurements and estimation of the energy dissipated in the nSQUID shift register.

(2)研究成果の今後期待される効果

Earlier [2] we introduced the “Flying Qubit Logic” (FQL) that could be built using the nSQUID arrays. It has two unique advantages: it allows to transfer quantum data along the chip and to bypass the problem of controllable keys. Let us explain the latter feature in greater details. Any two-qubit quantum logic operation can be described as a rotation in the appropriate part of the Hilbert space. The rotation angle depends only on the relevant interaction energy E of the two qubits and the time duration T of the operation:

$$\mathcal{G} = (2/\hbar) \cdot E \cdot T \quad (2)$$

Examples of this are the rotation by $\mathcal{G} = \pi$ (180 degree) which underlies negation, i.e. inversion of the qubit state in the computational basis. Another, even more frequently encountered case is the $\pi/2$ -rotation (by 90 degrees). To implement this rotation, one needs to have know that

$$E \cdot T = h/8 \quad (3)$$

where h is the Plank's constant. The last equation gives the relation between the coupling energy and the time necessary to complete the quantum rotation. The interaction of qubits necessary for the rotation (and therefore for the logic operation) could be provided by the two strings of nSQUIDs coupled as shown in Fig. 8. Interaction energy E is estimated then as $(\Phi_1 - \Phi_2)^2 / Lq$, where Φ_1 and Φ_2 are the differential fluxes in the first and the second nSQUID strings, which have rather limited ranges, say, from $0.1\Phi_0$ to $0.001\Phi_0$ while any desirable value of Lq could be implemented rather easily. Time of interaction T is inversely proportional to the speed of moving qubits. Of course the practical time dependence of the interaction would not have a rectangular shape but it still could be presented as a pulse (Fig. 8b).

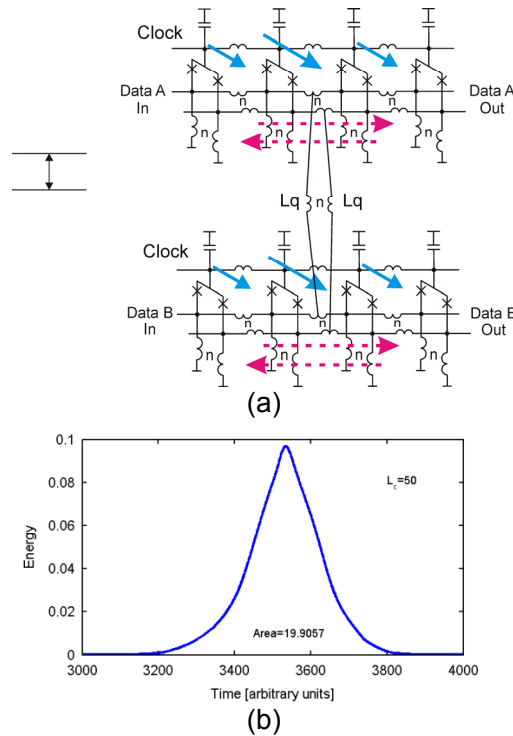


Fig. 8. A two-input quantum logic gate. (a) – equivalent circuit and notation, (b) – dependence of the interaction energy of two moving qubits on time.

In fact, the cell we discussed right now is to a large extent all that is need to build a complex multi-qubit circuit of nSQUIDs. Figure 9 shows the sketch of the general structure of such a circuit, where the strings of nSQUIDs are shown by solid lines and the two-input gates are shown by the double-sided arrows. This kind of structure is very convenient for at least a simple set of experiments. Its main advantage is the ability to “adjust” the interaction parameters by changing the speed of flying qubits.

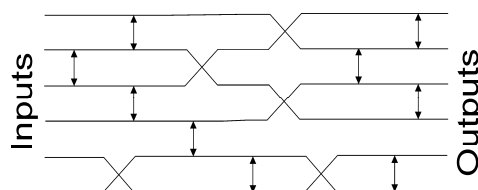


Fig. 9. General structure of nSQUID network operating in a quantum mode.

- [1]V.K. Semenov, G.V. Danilov, and D.V. Averin, "Negative-inductance SQUID as the basic element of reversible Josephson-junction circuits," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13(2), pp. 938-43, 2003.
- [2]V.K. Semenov, G.V. Danilov, and D.V. Averin, "Classical and quantum operation modes of the reversible Josephson-junction logic circuits," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17(2), pp. 455-61, 2007.
- [3]D.V. Averin, K. Rabenstein, and V.K. Semenov, "Rapid Ballistic Readout for Flux Qubits," Phys. Rev. B, vol. 73, 094504, 2006.
- [4]P. Russer, "General energy relations for Josephson junctions", Proc. of IEEE, vol. 59, #2, p. 282, 1971. (Manley-Rowe for JJs)
- [5] J. Beyer and D. Drung, "A SQUID series array dc current sensor", Supercond. Sci. Technol., vol. 21, #095012, 2008.

3. 7 量子ビットの制御・観測に関する理論的評価(東京大学グループ)

(1)研究実施内容及び成果

理論グループ(東京大学)では、超伝導量子ビットにおいて(1)量子ビットのデザインに関する理論的提案、および(2)デコヒーレンス時間の理論的評価を行ってきた。主に NEC グループと議論を行い、NEC グループで行われた実験について意見交換を行った。具体的には実験結果を解析するための数値シミュレーションについて、アドバイスをを行った。最近では、メーザー発振やパラメトリック共鳴・非線形現象などについて議論を行った。並行して、他の研究機関の研究者と共同で、(i)超伝導/金属強磁性体/超伝導接合を用いた超伝導磁束量子ビットの提案とデコヒーレンス評価、および(ii)高温超伝導体を用いた超伝導接合における散逸・デコヒーレンスの評価を行った。これらの成果について以下に詳しく述べる。

(i)超伝導接合間の位相差が π のときにエネルギーが最小となる、いわゆる π 接合を用いた量子ビットの提案を行った。 π 接合を用いた量子ビットは、すでに Ioffe らによって 10 年前に提案されていたが、回路が複雑であり、またサブギャップ抵抗に由来する散逸の効果の評価がまったく行われていなかった。 π 接合自体は当初、高温超伝導体接合で実現されていたが、接合の作成が難しいという難点を抱えていた。最近になり超伝導/金属強磁性体/超伝導接合(以下、SFS 接合と呼ぶ)において π 接合が実現されることが実験的に確かめられるようになった。SFS 接合では、従来の微細加工技術が利用できるなどの利点を持つ一方、サブギャップ抵抗や臨界電流の値が小さく散逸の影響が大きいと予想される。以上の研究状況を背景として、磁束量子ビットに π 接合を付加したよりシンプルな超伝導回路を考え、デコヒーレンス時間を理論的に評価した。この新しい量子ビットでは、量子二準位系を実現するための外部磁場が不要であり、外部磁場由来のノイズを抑制することが可能である。

モデルとしては、通常使われる超伝導磁束量子ビットの回路に直列に π 接合を挿入した回路を用いた。 π 接合でのジョセフソンエネルギーが十分大きいと仮定し、 π 接合での位相差がほぼ π となるような状況を考えて。さらに π 接合の散逸を、Caldeira-Leggett 模型によって表現した。この模型において、量子ビットのデコヒーレンスは π 接合と磁束量子ビットとの相互作用を通じて生じる。量子ビットに生じる有効的な散逸を求めるために、ファノ共鳴の理論を援用し、有効スペクトル関数を導出した。これにより、エネルギー縮退点におけるデコヒーレンス時間を計算することができる。

π 接合にはいくつかの候補があるが、ここでは一例として、超伝導/絶縁体/金属強磁性体/超伝導接合(以下、SIFS 接合と呼ぶ)に関して、最近の Weides らによる実験のパラ

メータを用いることで、デコヒーレンス時間を具体的に評価した。デコヒーレンス時間は、位相緩和時間とエネルギー緩和時間の二つによって決まる。縮退点では位相緩和が特に抑制され、Weides らの実験状況ではデコヒーレンス時間にほとんど影響しない。一方、エネルギー緩和時間は、Weides らの実験状況ではかなり短くなる。1マイクロメートル四方の接合では、デコヒーレンス時間は1ns 程度となった。デコヒーレンス時間を長くするためには、接合面積を大きくする、 π 接合の臨界電流を大きくする、 π 接合のサブギャップ抵抗を大きくする、などの方法があることを理論的に示した。(エネルギー緩和時間は、接合面積 \cdot π 接合のジョセフソンエネルギーの二乗 \cdot サブギャップ抵抗に比例する。)これは π 接合を用いた磁束量子ビットの設計指針となる。ここでは一例として SIFS 接合を議論したが、他の π 接合系においても同様の議論を行うことができる。

ここで提案した超伝導磁束量子ビットのメリットを考察するために、通常の外部磁場によるバイアスで生じるノイズの評価も行った。これまでの磁束量子ビットの実験では、位相バイアスを外部の磁場発生装置によって作っていた。この方法は簡便であるが、外部の磁束ノイズを除去するための磁気シールドが導入できなくなるという欠点がある。一方、制御電流回路を使って位相バイアスをかける場合には、電流源のノイズが問題となる。典型的な実験パラメータでは、十分なデコヒーレンス時間を確保するために制御電流をミリアンペア程度にとらなければならないため、非現実的である。最近、Delft の実験グループが使っている磁気トラップによる位相バイアスは強力な方法であるが、これも磁気シールドを導入することが困難である。以上の考察から、我々が提案した π 接合を含む磁束量子ビット回路は、ノイズの少ない量子ビットの実現のための魅力的な選択肢を提供すると期待される。

この理論提案の後、Erlangen 大学の実験グループが SFS 接合を含む超伝導回路において位相量子ビットを作成し、ラビ振動の観測に成功した。この実験では、 π 接合を用いる利点はないが、 π 接合を含む超伝導回路で初めて実現された量子ビットの実験であるため、注目に値する。ここでのデコヒーレンス時間は、我々の理論によってよく説明された。今後の実験の発展を期待したい。

(ii) 最近になって、高温超伝導体を用いた接合を使った量子ビットの作成が盛んに研究されている。高温超伝導体接合は微細加工が難しいことが従来の超伝導接合と比べて不利であるが、高い転移温度などの利点も有する。そのため、将来の超伝導量子ビット実現の一つの候補として、理論研究を行うことは重要である。この系では、超伝導の秩序パラメータに節があるため、従来弱いと考えられていた準粒子散逸が重要になる可能性がある。さらに接合の配置によっては、接合界面にアンドレーエフ束縛状態が形成される。これらの影響を理論的に考察した。

まずc軸方向に形成された接合について考察した。準粒子散逸を記述する有効作用を導出し、巨視的量子トンネル現象のトンネル確率を計算した。接合のツイスト角に依存して、ジョセフソンエネルギーおよび有効的な散逸強度が変化することを示し、これによってスイッチ電流の分布が変化していくことを示した。これらは最近のビスマス系超伝導体における実験とコンシステントである。

次に同じくc軸接合における量子コヒーレンスを議論した。準粒子散逸は、Caldeira-Leggett 理論におけるスーパーオーミック散逸にあたる。この散逸の元でのコヒーレント \cdot インコヒーレントクロスオーバーを、量子モンテカルロ法によって解析した。その結果、従来のカットオフ無限大極限では生じなかったコヒーレント \cdot インコヒーレントクロスオーバーが、有限のカットオフ(超伝導ギャップに対応する)のもとでは生じることが示された。

さらに ab 軸方向に形成された接合における巨視的量子トンネル現象を議論した。この場合は、接合角によってはアンドレーエフ束縛状態が存在し、トンネル確率が大きく抑えられることを示した。また、アンドレーエフ束縛状態が存在しない場合には、量子トンネル現象に与える散逸の効果は十分に小さいことを示した。

(2) 研究成果の今後期待される効果

(i) SFS 接合による π 接合を用いた超伝導磁束量子ビットの実験が今後盛んになると期待している。ヨーロッパのいくつかの実験グループが品質のよい SFS 接合を作成すべく実験を重ねている。特に Erlangen 大学のグループでは、我々の提案した量子ビットの作成を目標として、量子ビットの作成の実験を行っている。この実験では、我々の理論が量子ビット設計に関して有益な情報を与えている。今後、特に量子ビットの数が増えたときに、我々の提案した量子ビットのデザインが有効となる可能性がある。

(ii) 高温超伝導体を用いた接合は、接合の作成の仕方にバラエティがあり、それに対応して、散逸の強度が異なる。我々の理論は、これらの系での量子ビット作成の基本的な設計指針を与えると期待される。

§ 4 研究参加者

① NECグループ(量子ビットシステムの研究)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	蔡 兆申	NECナノエレクトロニクス研究所	主席研究員 非常勤チームリーダー	量子ビットシステム	H15.10～H21.3
○	中村泰信	NECナノエレクトロニクス研究所	主席研究員 非常勤研究員	量子ビットシステム	H15.10～H21.3
	萬 伸一	NECナノエレクトロニクス研究所	研究部長	量子ビット高速制御回路開発	H19.4～H21.3
	山本 剛	NECナノエレクトロニクス研究所	主任 非常勤研究員	量子ビットシステム	H15.10～H21.3
*	Harrabi Khalil	JST(NEC ナノエレクトロニクス研究所)	CREST研究員	量子ビットシステム試作	H16.4～H21.3
*	Niskanen Antti	JST(NEC ナノエレクトロニクス研究所)	CREST研究員	量子ビットシステム実験	H17.8～H19.4
*	松葉一顕	東京工業大学	研究補助員	量子ビットシステム試作補助	H15.10～H20.10
*	倉岡潤子	JST(NEC ナノエレクトロニクス研究所)	研究補助員	研究チーム事務	H15.12～H19.11
*	島田牧子	JST(NEC ナノエレクトロニクス研究所)	研究補助員	研究チーム事務	H19.12～H21.3

② ISTECCグループ(量子ビットインターフェイスシステムの高速制御)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	日高 睦夫	(財)国際超電導産業技術研究センター	室長	量子ビットシステム開発	H15.10～H21.3
	萬 伸一	(財)国際超電導産業技術研究センター	主管研究員	SFQ 高速制御回路開発	H15.10～H19.3
*	宮崎 利行	(財)国際超電導産業技術研究センター	CREST 研究員	SFQ 高速制御回路開発	H16.5～H21.3

③横浜国立大学グループ(SFQによる量子ビットの操作)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	吉川 信行	横浜国立大学 大学院工学研 究院	教授	量子ビット操作回路 の研究	H15.10～ H21.3
	金田 久善	横浜国立大学 大学院工学研 究院	助手	SFQ回路の設計と 計測	H15.10～ H21.3
	藤原 完	横浜国立大学 大学院工学府 物理情報工学 専攻	博士課程後期	SFQ回路の設計と 計測	H15.10～ H16.3
	山梨 裕希	横浜国立大学 大学院工学府 物理情報工学 専攻	博士課程後期	SFQ回路の設計と 計測	H15.10～ H19.10
	齊藤裕一郎	横浜国立大学 大学院工学府 物理情報工学 専攻	修士課程学生	SFQ回路の設計と 計測	H19.4～ H21.3
	竹内尚輝	横浜国立大学 大学院工学府 物理情報工学 専攻	修士課程学生	SFQ回路の設計と 計測	H20.3～ H21.3

④名古屋大学グループ(SFQによる量子ビットの高速・高精度観測)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	藤巻 朗	名古屋大学	教授	T/D 変換器の検討	H15.10～ H21.3
	赤池 宏之	名古屋大学	助教	微小接合の作成	H17.10～ H21.3
*	関谷 彰人	名古屋大学大学 院工学研究科	CREST研究員	T/D 変換器の作成	H15.10～ H18.2
*	田中 雅光	名古屋大学	博士課程学生 (研究補助員)	SFQ 集積回路設計	H15.10～ H17.3
*	山田 隆宏	名古屋大学	博士課程学生 (研究補助員)	アナログ部設計	H15.10～ H18.3
*	御田村直樹	名古屋大学	博士課程学生 (研究補助員)	読出回路設計評価	H17.11～ H21.3
	寺部 雅能	名古屋大学	修士課程学生	読出回路の設計	H18.5～ H19.3
	梶野 顕明	名古屋大学	修士課程学生	読出回路の評価	H18.5～ H19.3
	沼部 英雄	名古屋大学	修士課程学生	システムの設計	H18.5～ H20.3

	中村 茂樹	名古屋大学	修士課程学生	読出回路の評価	H19.4～ H21.3
	東 洋介	名古屋大学	修士課程学生	システムの設計	H20.4～ H21.3

⑤理研グループ(量子情報処理の物理的実現のための理論的研究)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	Nori Franco	RIKEN	チームリーダー	固体素子量子ビットの研究	H18.5～ H21.3
*	劉 玉璽	RIKEN	基幹研究員	超伝導量子ビットの研究	H18.5～ H21.3
	Frank Gaitan	Southern Illinois University at Carbondale, USA	Associate Professor	超伝導量子ビットの研究	H20.4～ H21.3
	Xuedong Hu	University of Buffalo, USA	Associate Professor	超伝導量子ビットの研究	H20.4～ H21.3
*	王 向斌	Tsinghua University, China	Professor	超伝導量子ビットの研究	H18.5～ H21.3
*	偉 聯福	Southwest Jiaotong University, China	Professor	超伝導量子ビットの研究	H18.5～ H21.3
	薛 飛	Israel Institute of Technology, Haifa	Post Doctoral Fellow	超伝導量子ビットの研究	H18.11～ H21.3
	Anatoly Smirnov	D-Wave Systems Inc, Canada	Senior Researcher	超伝導量子ビットの研究	H18.7～ H21.3
	Zagoskin Alexandre	University of Loughborough,	Lecturer	超伝導量子ビットの研究	H18.5～ H21.3
	Grajcar Miroslav	Comenius Univ., Slovakia	Associate Professor	超伝導量子ビットの研究	H18.5～ H21.3
	Jianqiang You	Fudan Univ.	Professor	超伝導量子ビットの研究	H20.7～ H21.3
	Jing Zhang	Tsinghua University, China	Lecturer	超伝導量子ビットの研究	H20.7～ H21.3
	Ran Li	Kent State University (US)	Assistant Professor	超伝導量子ビットの研究	H20.6～ H21.3
	塩川 一登 武	National Center for Theoretical Sciences (Taiwan)	Visiting Associate Professor	超伝導量子ビットの研究	H18.5～ H21.3
*	丸山 耕司	RIKEN	基幹研究員	超伝導量子ビットの研究	H18.5～ H21.3
	Ashhab Sahel	RIKEN (Univ. of Michigan)	客員研究員 (Post doctoral Fellow)	超伝導量子ビットの研究	H18.5～ H21.3
	David Daems	Universite de Libre de Bruxelles	Researcher	超伝導量子ビットの研究	H20.11～ H21.3
	Daniel Burgarth	Wolfson College, England	Junior Research Fellow	超伝導量子ビットの研究	H20.9～ H21.3

*	Iulia Buluta	RIKEN	基幹研究員	超伝導量子ビットの研究	H20.1 ~ H21.3
---	--------------	-------	-------	-------------	---------------

⑥SUNY グループ(量子ビット用SFQ設計・実験、超伝導可逆回路)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	セミノフ、ヴァシリー	ニューヨーク州立大学ストーニブルック校、物理天文学部	教授	SFQ回路設計	H16.4~H21.3
○	アベリン、デミトリ・V	ニューヨーク州立大学ストーニブルック校、物理天文学部	教授	非破壊読み出し、デコヒーリング	H15.10~H21.3
	ポルヤコブ A.ユーリ	ニューヨーク州立大学ストーニブルック校	博士課程学生	SFQ 回路設計および測定	H19.4~H20.3
	レン ジー	ニューヨーク州立大学ストーニブルック校	博士課程学生	SFQ 回路設計および測定	H19.4~H21.3
	ナラヤナ スプラディープ	ニューヨーク州立大学ストーニブルック校	博士課程学生	SFQ 回路設計および測定	H19.4~H20.3

⑦東京大学グループ(量子ビットの制御・観測に関する理論的評価)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	加藤 岳生	東京大学物性研究所物性理論研究部門	准教授	量子ビットの制御・観測に関する理論的評価	H15.10~H21.3

§ 5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Frank Gaitan	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H20.10 ~ H20.12
王 向斌	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H20.8~H20.9
偉 聯福	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H20.7~H20.9
薛 飛	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H18.11~H19.3

Anatoly Smirnov	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H18.7~H18.12 H19.1~H19.4 H20.2~H20.6 H20.10 ~ H20.12
Ran Li	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H20.6~H20.9
Grajcar Miroslav	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H20.5~H20.6
Jianqiang You	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H20.7~H20.9
Daniel Burgarth	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H20.9~H20.11
David Daems	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H20.11 ~ H20.12
Iulia Buluta	超伝導量子ビットの研究のため	RIKEN	H20.10~H21.3
Antti O. Niskanen	超伝導量子ビットに関する技術討議と実験	NEC	H20.8

§ 6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1件、国際(欧文)誌 117件)

"Controllable scattering of a single photon inside a one-dimensional resonator waveguide"

Phys. Rev. Lett. **101**, 100501, Sept. 2008

L. Zhou, Z.R. Gong, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori

"Vacuum Rabi splitting due to strong coupling of a flux qubit and a coplanar-waveguide resonator"

PHYSICAL REVIEW B **78**, 180502(K) 2008

Abdulfarrukh A. Abdumalikov Jr., Oleg Astafiev, Yasunobu Nakamura, Yuri A. Pashkin and Jaw-Shen Tsai

"Pseudo-Rabi oscillations in superconducting flux qubits in the classical regime"

Phys. Rev. B **78**, 054512 Aug. 2008

A.N. Omelyanchouk, S.N. Shevchenko, A.M. Zagoskin, E. Il'ichev, F. Nori

"Entanglement purification without controlled-NOT gates by using the natural dynamics of spin chains"

Phys. Rev. A **78**, 022312, Aug. 2008

K. Maruyama, F. Nori

"Atomic physics with a circuit"

Nature Physics **4**, 589, Aug. 2008

F. Nori

"Protecting entanglement in superconducting qubits"

quant-ph>arXiv: 0808.0395, Aug. 2008
J. Zhang, Y.X. Liu, C.-W. Li, T.-J. Tam, F. Nori

"Parametrically-induced tunable coupling between flux qubits dependence on the coupler bias"

LT25 Proceedings, Aug. 2008
Khalil Harrabi, Fumiki Yoshihara, Antti O. Niskanen, Yasunobu Nakamura and Jaw-Shen Tsai

"Superconducting non-linear resonator for non-destructive readout of a flux qubit"

LT25 Proceedings, Aug. 2008
K. Inomata, M. Watanabe, T. Yamamoto, K. Matsuba, Y. Nakamura and J. S. Tsai

"The physics of Maxwell's demon and information"

Reviews of Modern Physics in press, Aug. 2008
K. Maruyama, F. Nori and V. Vedral

"Lower limit on the achievable temperature in resonator-based sideband cooling"

Phys. Rev. B **78**, 035406 Jul. 2008
M. Grajcar, S. Ashhab, J.R. Johansson, F. Nori

"Distinguishing quantum from classical oscillations in a driven phase qubit"

New J. Phys. **10**, 073026 Jul. 2008
S.N. Shevchenko, A.N. Omelyanchouk, A.M. Zagoskin, S. Savel'ev, F. Nori

"Cavity optomechanical coupling assisted by an atomic gas"

Phys. Rev. A **78**, 013824, Jul. 2008
H. Ian, Z.R. Gong, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori

"Efficient purification protocols using iSWAP gates in solid-state qubits"

quant-ph>arXiv: 0807.4788, Jul 2008
T. Tanamoto, K. Maruyama, Y.X. Liu, X. Hu, F. Nori

"Cooling a mechanical resonator via coupling to a tunable double quantum dot"

Cond-mat>arXiv: 0807.4833, Jul. 2008
S.-H. Ouyang, J.Q. You, F. Nori

"Flux-driven Josephson parametric amplifier"

APPLIED PHYSICS LETTERS **93**, 042510, Jul. 2008
T. Yamamoto, K. Inomata, M. Watanabe, K. Matsuba, T. Miyazaki, W.D. Oliver, Y. Nakamura, and J. S. Tsai

"Quantum entanglement via two-qubit quantum Zeno dynamics"

Phys. Rev. A **77**, 062339, Jun 2008
X.-B. Wang, J.Q. You, F. Nori

"Kerr nonlinearity induced by an optical cavity"

quant-ph>arXiv: 0805.4102, May 2008
Z.R. Gong, H. Ian, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori

"Voltage-driven quantum oscillations in graphene"

New J. Phys. 10, 053024, 9pp, May 2008

V.A. Yampol'skii, S. Savel'ev, F. Nori

"Quantum electrodynamics and photon-assisted tunnelling in long Josephson junctions"

Cond-mat>arXiv: 0804.2173, Apr. 2008

A.O. Sboychakov, S. Savel'ev, F. Nori

"Efficient quantum circuits for one-way quantum computing"

Cond-mat>arXiv: 0804.2290, Apr. 2008

T. Tanamoto, Y.X. Liu, X. Hu, F. Nori

"Generation of squeezed states of microwave radiation in a superconducting resonant circuit"

cond-mat>arXiv: 0804.4186, Apr. 2008

A.M. Zagoskin, E. Il'ichev, M.W. McCutcheon, J. Young, F. Nori

"Quantum metamaterials: Electromagnetic waves in a Josephson qubit line"

Phys. Rev. B **77**, 144507 Apr. 2008

A.L. Rakhmanov, A.M. Zagoskin, S. Savel'ev, F. Nori

"Transport properties of nanoscale Nb and NbN Josephson junctions fabricated by focused-ion-beam milling"

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 103, 074303, Apr. 2008

Kazuaki Matsuba, Michio Watanabe, and Jaw-Shen Tsai

"Single-artificial-atom lasing and its suppression by strong pumping"

cond-mat>arXiv:0803.1209, Mar. 2008

S. Ashhab, J.R. Johansson, A.M. Zagoskin, F. Nori

"Disturbance without the force"

Nature **452**, 298-299, Mar. 2008

A. Tonomura, F. Nori

"Comment on: "Introducing the Transmon: a new superconducting qubit from optimizing the Cooper Pair Box"

quant-ph>arXiv: 0803.4306, Mar. 2008

J.Q. You, X. Hu, S. Ashhab, F. Nori

"Controllable Coherent Population Transfers in Superconducting Qubits for Quantum Computing"

Phys. Rev. Lett. 100, 113601, Mar. 2008

L. F. Wei, J. R. Johansson, L. X. Cen, S. Ashhab, and Franco Nori,

"Spectroscopy of superconducting charge qubits coupled by a Josephson inductance"

Phys. Rev. B, 77, 064505, Feb, 2008

Yamamoto T., Watanabe M., You J. Q., Pashkin Y., Astafiev O., Nakamura Y., Nori F., and Tsai J. S.

"Fully-connected network of superconducting qubits in a cavity"

Quantum Physics submitted, Feb. 2008

D.I. Tsomokos, S. Ashhab, F. Nori

"Resonances between fluxons and plasma waves in underdamped Josephson transmission lines of stripline geometry"

Phys. Rev. B, 77, 024511-1--024511-6, Jan, 2008

J. Pfeiffer, A. Abdumalikov, M. Schuster and A. V. Ustinov

"Interqubit coupling mediated by a high-excitation-energy quantum object"

Phys. Rev. B, 77, 14510, Jan. 2008

Ashhab S. S, Niskanen A. O., Harrabi K., Nakamura Y., Picot T., Groot P., Harmans C., Mooij J., and Nori F.

"High-frequency metallic nanomechanical resonators"

Appl. Phys. Lett., 92, No. 4, 043112, Jan. 2008

Li T., Pashkin Y., Astafiev O., Nakamura Y., Tsai J. S., Im H.

"Simultaneous Cooling of an Artificial Atom and Its Neighboring Quantum System"

Phys. Rev. Lett. 100, 047001, Jan. 2008

J. Q. You, Yu-xi Liu, and Franco Nori

"Theory of Macroscopic Quantum Tunneling and Dissipation in High-Tc Josephson Junctions"

Supercond. Sci. Tech. 20, S6, Dec. 2007

S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, T. Kato, and A. Golubov,

"Cooling a Micro-mechanical Beam by Coupling it to a Transmission Line"

Phys. Rev. B **76**, 205302, Nov. 2007

F. Xue, Y.D. Wang, Y.-x. Liu, F. Nori

"Decoherence in a superconducting flux qubit with a π -junction"

Physical Review B, 76, 172502, Nov. 2007

T. Kato, A. A. Golubov, and Y. Nakamura

"Detecting mode entanglement: The role of coherent states, superselection rules and particle statistics"

Phys. Rev. A **76**, 052113, Nov. 2007

S. Ashhab, K. Maruyama, F. Nori

"Modelling chemical reactions using semiconductor quantum dots"

Euro. Phys. Lett. **80**, 67008, Nov. 2007

A.Yu. Smirnov, S. Savel'ev, L.G. Mourokh, F. Nori

"Semiclassical dynamics of electron wave packet states with phase vortices"

Phys. Rev. Lett. **99**, 190404, Nov. 2007

K.Yu. Bliokh, Yu.P. Bliokh, S. Savel'ev, F. Nori

"Information entropic superconducting microcooler"

PHYSICAL REVIEW B 76, 174523, Nov. 2007

A. O. Niskanen, Y. Nakamura and J. P. Pekola

"Theory of macroscopic quantum tunneling in high-T_c c-axis Josephson junctions"

Phys. Rev. B 76, 134501, Oct. 2007

T. Yokoyama, S. Kawabata, T. Kato, and Y. Tanaka

"Theory of macroscopic quantum coherence in d-wave superconductor junctions"

Physica C, 463-465, 157-160, Oct. 2007

T. Umeki, T. Kato, T. Yokoyama, Y. Tanaka, S. Kawabata, and S. Kashiwaya

"Single artificial-atom lasing"

Nature Vol449, Oct. 2007

O. Astafiev, K. Inomata, T. Yamamoto, Yu. Pashikin, Y. Nakamura, J. S. Tsai

"Teleportation of qubit states through dissipative channels: Conditions for surpassing the no-cloning limit"

Phys. Rev. A 76, 042325, Oct. 2007

Sahin Kaya Ozdemir, Karol Bartkiewicz, Yu-xi Liu, and Adam Miranowicz

"Superconducting qubits can be coupled and addressed as trapped ions"

Phys. Rev. B, 76, 144518, Oct. 2007

Liu Y., Wei L., Johansson R., Tsai J, and Nori F.

"Switchable coupling for superconducting qubits using double resonance in the presence of crosstalk"

Phys. Rev. B 76, 132513, Oct. 2007

S. Ashhab, F. Nori

"Quantum thermodynamic cycles and quantum heat engines"

Phys. Rev. E 76, 031105, Sep. 2007

H. T. Quan, Yu-xi Liu, C. P. Sun, and Franco Nori

"Global Relaxation of Superconducting qubits"

Phys. Rev. B, 76, 100505, Sep. 2007

T. Ojanen, A. O. Niskanen, Y. Nakamura and A. A. Abdumalikov Jr.

"Qubits ride the photon bus"

NATURE, Vol 449, 27 September 2007

Antti O. Niskanen and Yasunobu Nakamura

"Parity effect in Al and Nb single electron transistors in a tunable environment"

Applied Physics Letters 91, 6, 063512, Aug. 2007

Yu. A. Pashkin, T. F. Li, H. Im and J. S. Tsai

"Two-Mode Squeezed States and Entangled States of Two Mechanical Resonators"

Phys. Rev. B 76, 064305, Aug. 2007

F. Xue, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori

"Variable-frequency-controlled coupling in charge qubit circuits: Effects of microwave field on qubit-state readout"

Phys. Rev. A **76**, 022317, Aug. 2007
X.-L. He, Y.X. Liu, J.Q. You, F. Nori

"Quantum information processing using frequency control of impurity spins in diamond"

Phys. Rev. B **76**, 014122, Jul. 2007
A.M. Zagoskin, J.R. Johansson, S. Ashhab, F. Nori

"Switchable coupling between charge and flux qubits"

Phys. Rev. B **76**, 024517, Jul. 2007
X.-L. He, J.Q. You, Y.X. Liu, L.F. Wei, F. Nori

"Low-frequency charge noise in suspended aluminum single-electron transistors"

Appl. Phys. Lett. **91**, No.3,033107, Jul. 2007
PashkinY, AstafievO.V, Nakamura Y., Tsai J.

"Two-level systems driven by large-amplitude fields"

Phys. Rev. A **75**, 063414, Jun. 2007
S. Ashhab, J.R. Johansson, A.M. Zagoskin, F. Nori

"Control of photon propagation via electromagnetically induced transparency in lossless media"

Phys. Rev. A **75**, 063818, June 2007
L. He, Y.X. Liu, S. Yi, C.P. Sun, F. Nori

"Development of SFQ Multi-Chip Modules for Quantum Bits"

IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, pp. 158-161, June, 2007.
T. Miyazaki, S. Yorozu, M. Maezawa, M. Hidaka and J.S. Tsai

"Study of LR-Loading Technique for Low-Power Single Flux Quantum Circuits"

IEEE Trans. Applied Superconductivity. vol. 17, June 2007, pp. 150-153.
Y. Yamanashi, T. Nishigai, N. Yoshikawa

"Design of an SFQ Microwave Chopper for Controlling Quantum Bits"

IEEE Trans. Applied Superconductivity. vol. 17, June 2007, pp. 146-149.
G. Matsuda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa

"Timing Jitter Measurement in Single-Flux-Quantum Circuits Based on Time-to-Digital Converters with High Time-Resolution"

IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, No.2, 552-555, Jun. 2007
M. Terabe, A. Sekiya, T. Yamada, A. Fujimaki

"Classical and quantum operation modes of the reversible Josephson junction circuits"

IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol. 17, #2, pp. 455-60 Jun. 2007
V.K. Semenov, G.Danilov and D.V. Averin

"Deterministic generation of large cluster states using non-deterministic collective measurements based on quantum Zeno effect"

arXiv:quant-ph/0701007v1, Jan. 2007
X. Wang, J.Q. You, F. Nori

"Quantum Coherent Tunable Coupling of Superconducting Qubits"

Science 316, 723, May 2007

A. O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura, S. Lloyd and J. S. Tsai

"Efficient one-step generation of large cluster states with solid-state circuit"

Phys. Rev. A **75**, 052319, May 2007

J.Q. You, X.-B. Wang, T. Tanamoto, F. Nori

"Generation of macroscopic entangled states in coupled superconducting phase qubits"

J. Phys. Soc. Jpn **76**, 054802, May 2007

S. Matsuo, S. Ashhab, T. Fujii, F. Nori, K. Nagai, N. Hatakenaka

"Quantum electromechanics: Quantum tunneling near resonance and qubits from buckling nanoscale bars"

Phys. Rev. B **75**, 165417, Apr. 2007

S. Savel'ev, A.L. Rakhmanov, X. Hu, A. Kasumov, F. Nori

"Low-decoherence flux qubit"

Phys. Rev. B **75**, 140515(r), Apr. 2007

J.Q. You, X. Hu, S. Ashhab, F. Nori

"Modeling an adiabatic quantum computer via an exact map to a gas of particles"

Phys. Rev. Lett. **98**, 120503, Mar. 2007

A.M. Zagoskin, S. Savel'ev, F. Nori

"Characterization of all-Nb nanodevices fabricated by electron beam lithography and ion beam oxidation"

J. Vac.Sci.Technol. B25(2), pp448-454, Mar. 2007.

H. Im, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura and J. S. Tsai

"Vertically-coupled quantum wires in a longitudinal magnetic field"

Applied Physics Letters, v. 90, Mar. 2007.

L. G. Mourkh, A. Yu. Smirnov and S. F. Fisher

"Persistent single-photon production by tunable on-chip micromaser with a superconducting quantum circuit"

Phys. Rev. B **75**, 104516, Mar. 2007

J.Q. You, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori

"Observing quantum nonlocality in the entanglement between modes of massive particles"

Phys. Rev. A **75**, 022108, Feb. 2007

S. Ashhab, K. Maruyama, F. Nori

"Enhancement of entanglement transfer in a spin chain by phase-shift control"

Phys. Rev. A **75**, 012325, Jan. 2007

K. Maruyama, T. Iitaka, F. Nori

"Probing tiny motions of nanomechanical resonators: classical or quantum mechanical?"

Phys. Rev. Lett. **97**, 237201, Dec. 2006

L.F. Wei, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori

"Spectroscopy of three strongly coupled flux qubits"

Physical Review B **74**, 220503(R), Dec. 2006

A.O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura and J. S. Tsai

"Producing Cluster States in Charge Qubits and Flux Qubits"

Physical Review Letters, **97**, 230501, Dec. 2006

T. Tanamoto, Y. Liu, S. Fujita, X. Hu and Franco Nori

"Switchable resonant coupling of flux qubits"

Phys. Rev. B **74**, 172505, Nov. 2006

M. Grajcar, Y.X. Liu, F. Nori, A.M. Zagorskin

"Comment on "Charge-qubit operation of an isolated double quantum dot"

Physical Review Letters, **97**, 208901, Nov. 2006

O. Astafiev, Y. Nakamura, Yu . A. Pashikn, T. Yamamoto and J. S. Tsai

"Scalable superconducting qubit circuits using dressed states"

Physical Review A, **74**, 052321, Nov. 2006

Yu-xi Liu, C. P. Sun and Franco Nori

"Maxwell's demon assisted thermodynamic cycle in superconducting quantum circuits"

Phys. Rev. Lett. **97**, 180402, Oct. 2006

H.T. Quan, Y.D. Wang, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori

"Design and implementation of low-power SFQ circuits using LR-load biasing technique"

Physica C, vol. 445-448, pp.1029-1033, Oct. 2006

T. Nishigai, S. Yamada, N. Yoshikawa

"On-chip microwave generator for manipulation of superconductive quantum bits"

Physica C, vol.445-448, pp.967-970, Oct. 2006

Y. Yamanashi, T. Asano, N. Yoshikawa

"Decoherence of Flux Qubits due to $1/f$ Flux Noise"

Physical Review Letters, **97**, 167001, Oct. 2006

F. Yoshihara, K. Harrabi, A. Niskanen, Y. Nakamura, J. S. Tsai

"Fabrication of Ultrasmall All-Nb Tunnel-Junction Devices with Ion Beam-Oxidized Barriers"

Journal of the Korean Physical Society Vol.48 6 pp1560-1564, Jun. 2006

H. Im, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai

"Parity effect in superconducting aluminum single electron transistors with spatial gap profile controlled by film thickness"

Applied physical Letters, 88, 212509, May 2006

T. Yamamoto, Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev and J. S. Tsai

"The influence of the ground current on large-scale single-flux-quantum circuits"

Supercond. Sci. Technol. 19, S362—S365, May 2006

K. Fujiwara, T. Hikida, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, S. Yorozu, H. Terai

"A new design approach for control circuits of pipelined single-flux-quantum microprocessors"

Supercond. Sci. Technol. 19, S340-S343, May 2006

Y. Yamanashi, A. Akimoto, N. Yoshikawa, M. Tanaka, T. Kawamoto, Y. Kamiya, A. Fujimaki, H. Terai, S. Yorozu

"Temperature square dependence of the low frequency 1/f charge noise in the Josephson junction qubits"

Physical Review Letters, 96, 137001, Apr. 2006

O. Astafiev, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, T. Yamamoto, J.S. Tsai

"Tunable coupling scheme for flux qubits at the optimal point"

Physical Review B 73, 094506, Mar. 2006

A. Niskanen, Y. Nakamura, J. S. Tsai

"Characterization of ultrasmall all-Nb tunnel junctions with ion gun oxidized barriers"

Applied Physics Letters, 88, 112113, Mar. 2006

H. Im, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai

"Rapid Ballistic Readout for Flux Qubits"

Physical Review B, 73, 094504, Mar. 2006

D.V. Averin, K. Rabenstein, V. S. Semenov

"Controllable Coupling between Flux Qubits"

Physical Review Letters, 96, 067003, Feb. 2006

Yu-xi Liu, L. F. Wei, J. S. Tsai, and Franco Nori

"Hybridized solid-state qubit in the charge-flux regime"

Physical Review B, 73, 014510, Jan. 2006

J. Q. You, J. S. Tsai, and F. Nori

"Macroscopic quantum criticality in a circuit QED"

quant-ph>arXiv:quant-ph/061026, Jan. 2006

Y.D. Wang, H.T. Quan, Y.X. Liu, C.P. Sun, F. Nori

"High-Resolution Analog-to Digital Converters toward Software-Defined-Radio Receivers"

IEICE Transactions on Electronics, Vol.E89-C, No.2, pp.113-118, 2006.

A. Fujimaki, Y. Nishido and A. Sekiya,

"Conditional gate operation in superconducting charge qubits"

Quantum Computing in Solid State Systems, Springer Science + Business Media Inc., New York (2006) p.10

T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, O. Astafeiv, Y. Nakamura and J. S. Tsai

"Measurement of Decoherence Time in a Flux Qubit"

Low Temperature Physics, 24th International Conference on Low temperature Physics, American Institute of Physics, 2006, p.935

K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura, and J. S. Tsai

"Progress in Fabrication Techniques for Small-Capacitance Josephson Junctions"

Josephson Junction and Superconductivity Research (Nova Science, New York, 2006)

M. Watanabe, K. Matsuba, Y. Nakamura, and J. S. Tsai

"Coherent manipulation of coupled Josephson charge qubits"

Physica C, Part 2, 426-431, 1552-1560, Oct. 2005

Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D. V. Averin, T. Tilma, F. Nori, and J.S. Tsai

"Design and implementation of double oscillator time-to-digital converter using SFQ logic circuits"

Physica C, vol. 426-431, Part 2, 1 October 2005, pp. 1699-1703.

T. Nishigai, M. Ito, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai and S. Yorozu

"Demonstration of chip-to-chip transmission of single-flux-quantum pulses at throughputs beyond 100 Gbps"

Applied Physics Letters Vol.87 pp.022502-1-3 11 July 2005

Y. Hashimoto, S. Yorozu, T. Satoh, T. Miyazaki

"Observation of quantized energy levels in a Josephson junction using SFQ circuits"

IEEE Trans. Applied Superconductivity. vol. 15, June 2005, pp. 864-867,.

Y. Yamanashi, M. Ito, A. Tagami, N. Yoshikawa

"Transmission of single-flux-quantum pulse between superconductor chips"

Appl. Phys. Lett. 86, 072502, Feb. 2005

Y. Hashimoto, S. Yorozu, and T. Miyazaki,

"Fast two-bit operations in inductively coupled flux qubits"

Phys. Rev. B 71, 024532, Jan. 2005

J. Q. You, Y. Nakamura, and F. Nori,

"超伝導単一磁束量子回路によるマルチビットアナログ-デジタル変換器の提案"

電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J88-C, No.7, pp.560-567, 2005.

関谷彰人, 西土佳典, 藤巻 朗,

"Demonstration of the Multi-Bit Sigma-Delta A/D Converter with the Decimation Filter"

IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.340-343, 2005.

A. Sekiya, K. Okada, Y. Nishido, A. Fujimaki and H. Hayakawa

"Decoherence and noise sources in Flux Qubit"

Proceedings of the 13th Quantum Information Technology Symposium (QIT 13), QIT2005 – 1 ~38, May 2005

F. Yoshihara, K. Harrabi, Y. Nakamura, and J.S. Tsai

"Decoherence of a Josephson junction flux qubit "

Proceedings of ISQM-Tokyo'05,
Eds. S. Ishioka and K. Fujikawa
(World Scientific, Singapore, 2005) p. 54.
Y. Nakamura, F. Yoshihara, K. Harrabi, and J. S. Tsai,

"Recent results in experiments with Josephson qubits"

Proceedings of the 1st Asia-Pacific Conference,
(World Scientific, Singapore (2005) p. 173.
O. Astafiev, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, Y. Nakamura,
and J. S. Tsai,

"Quantum Noise in the Josephson Charge Qubit"

Physical Review Letters, 93, 267007, Dec. 2004
Astafiev, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, Y. Nakamura, and J. S. Tsai

"Superconducting Digital Electronics"

Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 10, pp.1549-1563, October 2004
H. Hayakawa, N. Yoshikawa, S. Yorozu, A. Fujimaki

"High-speed measurement method of quantized energy levels in Josephson junctions using SFQ circuits"

Physica C, 412-414, 1546-1549, Oct. 2004
Y. Yamanashi, M. Ito, A. Tagami, N. Yoshikawa

"Design and implementation of SFQ programmable clock generators"

Physica C, 412-414, 1550-1554, Oct. 2004
M. Ito, N. Nakajima, K. Fujiwara, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Terai, S. Yorozu

"Single-shot measurement of the Josephson charge qubit"

Physical Review B 69, 180507, May 2004
Astafiev, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, Y. Nakamura, and J. S. Tsai

"Circuit with small-capacitance high-quality Nb Josephson junctions"

Applied Physics Letters, 84, 401, Jan. 2004
M. Watanabe, Y. Nakamura, and J. S. Tsai

"Coupled Josephson Quantum Bits"

Proceedings of SPIE, Noise and Information in Nanoelectronics, Sensors, and Standards II,
Editors: J.M. Smulko, Y. Blanter, M.I. Dykman, L.B. Kish, Volume 5472, 11, 2004
J. S. Tsai, T. Yamamoto, Yu. Y. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura

"Quantum coherent dynamics of two coupled superconducting charge qubits"

Proceedings of SPIE,
Quantum Informatics 2004,
ed. Y. Ozhigov, 5833, 116 (2004).
Yu. A. Pashkin, O. Astafiev, T. Yamamoto, Y. Nakamura,
D. V. Averin, T. Tilma, F. Nori, and J. S. Tsai,

(2)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

①招待講演(国内会議 31 件、国際会議 78 件)

"超電導量子計算システム-スーパーコンピュータを遥かに越える計算器を目指して"

理研 ASI 発足記念シンポジウム, 10/22/2008

蔡 兆申

"Quantum computing: How soon?"

NMDC 2008 The IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008, Oct. 20-22, 2008, Kyoto University, Kyoto

J. S. Tsai

"Microwave induced tunable coupling of flux qubits"

Quantum Dynamics in Dots and Junctions: Coherent Solid State Systems, Oct 5-10, 2008, Riva del Garda, Italy

J.-S. Tsai (NEC, Japan)

"Quantum computing based on superconducting device"

International Winter School: *Beyond Moore's Law*, Kenting, Taiwan, 1/10/2008

J. S. Tsai

"Single Artificial Atom Lasing"

2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2008), Sept. 23-26, 2008, Tsukuba International Congress Center, Ibaraki

J. S. Tsai

"Toward Scalable Superconducting Qubits"

ISPSA2008 The 14th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications, Aug. 26-29, 2008, Jeju, Korea

J. S. Tsai

"In Quest of Quantum Coherent Behaviour in Macroscopic Objects via Superconducting Devices"

25th International Conference on Low Temperature Physics, Amsterdam, Aug 6-13, 2008

J. S. Tsai and Y. Nakamura

"Controllable couplings via ac signals in superconducting qubits"

2nd International Workshop on Solid-State Quantum Computing & Mini-School on Quantum Information Science, Taiwan, June 23-28, 2008

Yuxi Liu and Franco Nori

"Superconducting Quantum Circuits: Symmetry and Controllability"

2nd International Workshop on Solid-State Quantum Computing & Mini-School on Quantum Information Science, Taiwan, June 23-28, 2008

Yuxi Liu and Franco Nori

"Single Artificial-atom maser"

APS March Meeting, 2008, New Orleans, LA, 10-14 Mar., 2008

Y. Nakamura

"Single Artificial-Atom Lasing"

Moriond 2008, Quantum Transport and Nanophysics, La Thuile, Italy, 8-14 Mar.,2008
O.Astafiev, Y. Nakamura, J.S. Tsai

"Single Artificial-Atom Lasing"

JPS, Osaka, March 2008
O.Astafiev, Y. Nakamura, J.S. Tsai

"Single Artificial-atom maser"

DPG Spring meeting, Berlin, Germany, 28 Feb.,2008
Y. Nakamura

"Entanglement purification by natural spin-spin interactions and single spin measurements"

OSA Workshop on Entanglement and Quantum Decoherence, 28-30 January 2008,
Nara, Japan.
Koji Maruyama

"Superconducting quantum computation"

4th CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity: Critical Current (NVLS2007-CC), December 17 (Mon)-18 (Tue), 2007. Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu, Japan
Franco Nori

"Switchable qubit and scalability"

International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, Hawaii, 12/4/2007
J. S. Tsai

"Scalable qubit with a switchable coupling scheme"

International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2007), Waikaloa, Hawaii, 2-7 Dec.,2007
J. S. Tsai

"Decoherence in Flux Qubit"

Decoherence in Superconducting Qubits (DiSQ) Workshop, UC Berkeley, CA, 06-07 Dec.,2007
Y. Nakamura

"量子コンピュータとそのデバイス—その実現に向けた超伝導デバイスの挑戦"

量子情報技術研究会 岡山開催記念特別講演会 「量子情報の夢と未来」、11/23/2007
蔡 兆申

"Superconducting qubits"

4th NTT-BRL School, Atsugi, 11/20/07
J. S. Tsai

"Superconductor Electronics based on Single-Flux-Quantum Circuit Technology"

East Asia Symposium on Superconductor Electronics, 11-15 December 2007, Delhi, India.
N. Yoshikawa

"超伝導量子ビットおよびその結合制御"

応用物理学会 超伝導分科会研究会 『基礎から学ぶ超伝導量子計算機』、東京、
11/15/2007
蔡 兆申

"Coupling of Josephson Qubits"

International school of Complexity, 8th course: "Noise, Information and Complexity at Quantum Scale", Erice, 11/7/2007
J. S. Tsai

"Superconducting Circuits as Artificial Atoms and Qubits"

Noise Information and Complexity @ Quantum Scale, 4-10 November 2007, Erice, Italy.
Franco Nori

"Toward Scalable Josephson Qubits"

Noise Information & Complexity @ Quantum Scale, Erice (Sicily), Italy, 4-10 Nov., 2007
J. S. Tsai

"Superconducting Low-temperature Electronics for Controlling Quantum bits"

20th International Symposium on Superconductivity, Nov. 2007
S. Yorozu, T. Miyazaki, Irina Kataeva, T. Yamamoto, Y. Nakamura, M. Hidaka and J. S. Tsai

"nSQUIDs as the basis for reversible and quantum computation with Josephson junctions"

Special invited seminar at the computer science department Moscow State University, October, 2007
D.V. Averin and V.K. Semenov

"Controllable coupling in superconducting quantum circuits"

Handa Nano-science and Nano-technology International Symposium: Spin, Photonic, and Molecular Devices in Quantum limit, Osaka University, Japan, 9/26 - 28/2007,
Yu-xi Liu and Nori Franco

"Making use of suspended AI nanostructures"

The 3rd European Conference on the Fundamental Problems of Mesoscopic Physics and Nanoelectronics, 11 Sep., 2007
Y. Pashkin, Y. Nakamura, J.S. Tsai

"Theoretical studies of superconducting qubits"

第三回量子情報未来テーマ開拓研究会, 28 August - 7 September 2007, 知念, 沖縄,
Franco Nori

"Controllable coupling in superconducting quantum circuits"

Quantum Information Science Summer School in Institute of Microelectronics of Tsinghua University, China, 20-24 Aug., 2007
Yu-xi Liu

"Parametrically induced tunable coupling between Superconducting flux qubits biased at coherence optimal point"

International Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2007, Washington D.C., 10-14 Jun.,2007

Y. Nakamura

"Quantum Mechanics and Information Processing"

NEC Technology Forum: *Technology Paradigm Shift in Computing & Communication*, Tokyo, 17 May 2007

J. S. Tsai

"Recent Progress on superconducting qubits"

Gordon Research Conference on Quantum Information Science, Il Ciocco, 15-20 Apr.,2007

Y. Nakamura

"Toward Scalable Superconducting Quantum Bits"

The BCS Theory of Superconductivity 50 years, Brown University, Providence, 13 Apr.,2007

J. S. Tsai

"Superconducting Qubits: quantum mechanics in electrical circuits"

NIMS School for Vortex Physics & Beyond, Tsukuba, 27-28 Mar.,2007

Y. Nakamura

"Science and Culture"

CAS-RIKEN Frontier Science Workshop, Beijing, China, 23 Mar.,2007

J. S. Tsai

"Demonstration of Parametric tunable coupling of optimally biased flux qubits"

International Conference on Nanoelectronics, Nanostructure & Carrier Interactions (NNCI), Atsugi, 20-23 Feb.,2007

Y. Nakamura

"Toward scalable Josephson qubit system"

2006 US-Japan Workshop on Quantum Information Science, Wailea, Hawaii, 10/18/2006

J. S. Tsai

"超伝導量子ビット制御に向けた超伝導モジュール技術"

電子情報通信学会 2006年ソサイエティ大会、金沢、2006年9月

萬伸一

"Decoy-state quantum key distribution: from theory to practice"

National Conference of Quantum Optical Society of China, Beijing, China, Aug.2006

Xiangbin Wang

"Imaging the quantum coherence: Readout for superconducting multi-qubit system"

The Brijuni Conference, Brijuni Island, Croatia, 8/30/2006

J. S. Tsai

"Decoy-state quantum key distribution: theory and experiment"

Second Asia-Pacific conference and KIAS/KAIST 2006 workshop on quantum information science Aug. 27-30, 2006, Seoul, Korea
Franco Nori

"Josephson Qubits with Controllable Couplings"

Recontres du Vietnam 2006 Nanophysics: *from fundamentals to applications*, Hanoi, Vietnam, 8.7.2006
J. S. Tsai

"Decoy-state quantum key distribution: from theory to practice"

Asia-Pacific Conference and KIAS-KAIST2006 Workshop on Quantum Information Science, Seoul, Korea, Aug. 2006
Xiangbin Wang

"Classical and Quantum Operation Modes of the Reversible Logic Circuits"

Applied Superconductivity Conference, Seattle, USA, Aug.2006
V. K. Semenov, G. Danilov, D. V. Averin

"Josephson Qubits with Controllable Couplings"

Macroscopic Quantum Coherence and Computing, Naples, Italy, 6/13/2006
J. S. Tsai

"Towards controllable coupling between Josephson qubits"

International Workshop on Solid-State Quantum Computing, Nanjing, China, 6/9/2006
J. S. Tsai

"Towards controllable coupling between Josephson qubits"

The 1st Fudan Conference of Quantum Computing, Shanghai, China, 6/3/2006
J. S. Tsai

"Rapid ballistic readout for flux qubits"

International workshop on Macroscopic quantum coherence and computing, Naples, Italy, Jun.2006
D. V. Averin, K. Rabenstein, V. K. Semenov

"Recent Progress in Rapid-Single-Flux-Quantum Circuits"

2006 International Conferences on Modern Materials and Technologies, Sicily, Italy, Jun.2006
A. Fujimaki, T. Yamada, M. Tanaka, H. Akaike, N. Yoshikawa

"Decoherence in flux qubit"

Quantum Coherence, Noise and Decoherence in Nanostructures, Dresden, Germany, May 2006
Y. Nakamura

"Qubit Devices with Solid State Nanostructures"

KANC International Symposium on Advanced Nanodevices Technology, Korea, 4/27/2006

J. S. Tsai

"Coupled Josephson charge qubits"

Condensed Matter and Materials Physics, Exeter, UK, Apr.2006

T. Yamamoto

"Toward Qubits System with Controllable Coupling"

International Conference on Quantum Computing and Back Action, Kanpur, India, 3/7/2006

J. S. Tsai

"Josephson/CMOS ハイブリッドメモリ"

日本学術振興会第 146 委員会「デジタル応用」分科会第 20 回分科会研究会、学士会館分館、東京、2006 年 2 月 7 日

吉川信行

"量子コンピュータを目指した超伝導量子ビットの研究"

2005年度 KEK 大型シミュレーション研究 ワークショップ「超高速計算機が切り開く計算物理学の展望」、2/7/2006

蔡 兆申

"Decoherence in a flux qubit"

International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, Atsugi, Feb.-Mar.2006

Y. Nakamura

"Quantum Computer and its Realization"

NASA International Conference on Quantum Computing and Many-Body Systems, Key West, USA, 2/1/2006

J. S. Tsai

"Tunneling without tunneling : wavefunction reduction in a mesoscopic qubit"

International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, Atsugi, Feb.-Mar.2006

D. V. Averin

"超伝導量子コンピュータの開発"

2005年度 KEK 大型シミュレーション研究 ワークショップ 「超高速計算機が切り開く計算物理学の展望」、つくば市、2006 年 2 月

蔡兆申

"超伝導量子コンピュータの開発"

京都大学、21 世紀 COE プログラム・シンポジウム、1/30/2006

蔡 兆申

"Coherence and decoherence in Josephson junction qubits"

Frontiers in Quantum Nanoscience, Noosa Blue Resort, Australia, Jan.2006

Y. Nakamura

"Recent Progress in Coupled Josephson Qubits"

Quantum Computing and Many Body Systems, Key West, USA, Jan.-Feb.2006
J. S. Tsai

“量子コンピュータを目指した超伝導量子ビットの研究”

京都大学21世紀COEプログラム、京都市、2006年1月
蔡兆申

“Recent Progresses in Josephson Qubits”

Quantum Information Device Meeting, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 5/12/2005
蔡 兆申

“量子コンピュータ・最先端技術開発”

日本工学教育協会 先端技術センター、東京、2005年12月
蔡兆申

“Fundamental Research on High-Resolution Analog-to-Digital Converters Based on the Single-Flux-Quantum Circuit”

The Third East Asia Symposium on Superconductive Electronics (EASSE2005),
Gyeongju, Korea, Nov. 14-16, 2005.
A. Fujimaki, Y. Nishido, T. Yamada, A. Sekiya, H. Akaike

“電子デバイスの将来と量子コンピュータ”

ツクバ・イン・アキバ2005、秋葉原、東京、9/21/2005
蔡 兆申

“Josephson qubits”

The 10th International Symposium on Advanced Physical Fields, NIMS Tsukuba,
3/9/2005
J. S. Tsai

“Quantum Computer and its Realization”

Chinese Engineering Association, Japanese Chapter General Meeting, Tokyo,
8/27/2005
J. S. Tsai

“Solid-State Devices in Future Integrated Systems”

FIS Conference on Future Electronics, Cambridge, UK, 8/8/2005
J. S. Tsai

“Josephson junction quantum bits”

24th International Conference on Low Temperature Physics, Orlando, USA, Aug.2005
Y. Nakamura

“Recent Progresses in Josephson Qubits”

MIT-NEC Mini-conference on quantum computing, Cambridge, USA, 7/18/2005
J. S. Tsai

“高速デジタルデバイスの原理と応用分野 ポスト半導体(over 100GHz)”

応用物理学会超伝導分科会主催第31回研究会、東京、2005年6月
吉川信行

"ピコ秒の時間分解能を持つ時間/デジタル変換器とその応用"

電子情報通信学会総合大会、豊中、2005年3月23日。
藤巻朗、関谷彰人、西土佳典(名古屋大学)

"単一磁束量子回路による超高速信号処理"

電子情報通信学会電子デバイス研究会、仙台、2005年3月3日。
藤巻朗、関谷彰人、田中雅光、山田隆宏(名古屋大学)

"Recent progresses in Josephson junction qubit"

International Conf. on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions, NTT Atsugi, 1/31/2005
J. S. Tsai

"Recent results in experiments with Josephson qubits"

1st Asia-Pacific Conference on Quantum Information Science, December, 2004
O. Astafiev

"Solid-state Josephson charge qubits"

Joint Workshop on Superconductivity, December, 2004
Y. Pashkin, O. Astafiev, T. Yamamoto, Y. Nakamura, D. Averin, Y. Nakamura, T. Tilma, F. Nori, J.S. Tsai

"Multi-bit Sigma-Delta Analog-to-Digital Converter Based on Single Flux Quantum Circuit"

17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004), Niigata, Nov. 24, 2004.
A. Sekiya, Y. Nishido, A. Fujimaki (Nagoya University)

"Sub-Kelvin SFQ circuits for support of superconducting qubits."

Conference: 17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004), Nov. 24, 2004.
V. Semenov, D. Averin, J. Pekola, A. Savin

"Development of Single-Flux-Quantum Microprocessors"

2004 International Symposium on Superconductivity (プレナリトーク), Nov. 23
A. Fujimaki, M. Tanaka, Y. Kamiya, T. Kawamoto, K. Takagi, N. Takagi, Y. Yamanashi, A. Akimoto, K. Fujiwara, N. Yoshikawa, H. Terai, S. Yorozu, Y. Takai

"量子コンピューティングに向けた超伝導量子ビットの最新の進展"

2004 セミコンジャパン、ナノテクノロジーセミナー、幕張、11/3/2004
蔡 兆申

"Recent progresses in superconducting charge qubit"

Functionality of Organized Nanostructures (FON'04) — Celebrating the 15th anniversary of the Atomcraft Project, Tsukuba, 11/2/2004
J. S. Tsai

"量子コンピュータの実現に向けて"

スーパーサイエンスハイスクール講演、高崎高校、11/2/2004
蔡 兆申

"Coherent manipulation of coupled Josephson qubits"

17th International Symposium on Superconductivity (ISS 2004), November, 2004
Y. Pashkin, O. Astafiev, T. Yamamoto, Y. Nakamura, D. Averin, Y. Nakamura, T. Tilma,
F. Nori, J.S. Tsai

"Superconducting Qubits"

Microelectronics Center Seminar, Tsunghua University, Beijing, 10/27/2004
J. S. Tsai

"Superconducting Qubits"

Concurrent Professor Seminar, Nanjin University, Nanjin, 10/24/2004
J. S. Tsai

"Superconducting Qubits"

Physics Department Seminar, Fudan University, Shanghai, 10/22/2004
J. S. Tsai

"Coherent dynamics of two coupled superconducting charge qubits"

International Symposium "Quantum Infomatics-2004", October, 2004
Y. Pashkin, O. Astafiev, T. Yamamoto, Y. Nakamura, D. Averin, Y. Nakamura, T. Tilma,
F. Nori, J.S. Tsai

"Energy relaxation of the Josephson charge qubit"

ERATO Conference on Quantum Information Science 2004 (EQIS'04), September,
2004
O. Astafiev, Y. Pashkin, Y. Nakamura, T. Yamamoto, J. S. Tsai

"ジョセフソン量子ビットの現状 - 量子コンピュータの実現に向けて"

平成16年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 チュートリアル講演、宇都宮、9/1
/2004
蔡 兆申

"Recent Progresses in Superconducting Charge Qubit"

KIAS-KAIST 2004 Workshop on Quantum Information Science, Seoul, 8/30/2004
J. S. Tsai

"Observation of Quantized Energy Levels in a Josephson Junction Using SFQ Circuits"

Applied Superconductivity Conference, August, 2004
Y. Yamanashi, M. Ito, A. Tagami, N. Yoshikawa

"量子コンピュータ実現にむけて一固体素子を用いた量子ビット論理演算回路の開発"

先端技術ワークショップ、東京、7/23/2004
蔡 兆申

"Recent Progresses in Superconducting Charge Qubits"

23rd Electronic Materials Symposium (EMS-23), Izu-Nagaoka, 7/7/2004
蔡 兆申

"Recent Progresses in Superconducting Qubits : Single shot readout and CNOT gate"

2004 Taiwan International Conference on Superconductivity & the 7th Workshop on Low Temperature Physics, Penghu, Taiwan, 7/6/2004

J. S. Tsai

"Recent Progresses in Superconducting Qubits"

MIT Stanford UC Berkeley Nanotechnology Forum, *Quantum Computation – A glimpse into future computation*, Stanford, 6/18/2004

J. S. Tsai

"Conditional gate operation in superconducting charge qubits"

Macroscopic Quantum Coherence and Computing Conference, Jun, 2004

T. Yamamoto, Y. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, J. S. Tsai

"Non-adiabatic state manipulation in single and coupled Josephson qubits"

Workshop on Quantum Systems out of Equilibrium, Jun, 2004

Y. Pashkin

"Quantum coherence and entanglement of two coupled superconducting charge qubits"

4th International Workshop on Macroscopic Quantum Coherence and Computing, Jun, 2004

Y. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, D. Averin, Y. Nakamura, T. Tilma, F. Nori, J.S. Tsai

"Coupled Josephson junction qubits"

SPIE Fluctuations and Noise Conference, *Noise and Fluctuation in Nanoelectronics, Sensors, and Standards II*, Maspalomas, Gran Canaria, 5/26/2004, *Keynote Presentation*

J. S. Tsai

"Coupled superconducting qubits"

The 3rd Cross-Strait Workshop on Nano Science and Technology, Hualeng, 4/29/2004

J. S. Tsai

"Josephson solid-state qubits"

Scientific Session of the Russian Academy of Sciences Division of Physical Sciences, April, 2004

Y. Pashkin, O. Astafiev, T. Yamamoto, Y. Nakamura, D. Averin, J. S. Tsai

"超伝導量子ビットの近況"

東京工業大学 21 世紀 COE プログラム 「量子ナノ物理」 第 1 回公開シンポジウム五反田
ゆうぼうと、3/17/04

蔡 兆申

"Macroscopic quantum entanglement in coupled charge qubits"

International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, MS+S2004, NTT Atsugi, 3/4/2004

J. S. Tsai

"Coupled charge qubits"

Vth Rencontres de Moriond in Mesoscopic Physics, La Thuile, 1/28/2004

J. S. Tsai

"量子コンピューター-SFQ回路を用いた周辺回路の可能性"

応用物理学会超伝導分科会主催第28回研究会、機会振興会館、東京、2003年12月
吉川信行

②口頭講演（国内会議 38件、国際会議 15件）

"Simple entanglement purification protocol by spin chain dynamics without CNOTs"

8th Asian Conference on Quantum Information Science (AQIS'08), Seoul, Korea Aug. 27-30, 2008

Koji Maruyama, Franco Nori,

"電磁界シミュレータを用いた超伝導伝送線路の三次元シミュレーション"

2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会、28p-NA-7、日本大学理工学部、2008年3月

竹内尚輝, 山梨裕希, 吉川信行

"磁束量子ビットの状態読み出しに向けた SFQ 回路の試作と評価"

2008年春季応用物理学関係連合講演会、日本大学、2008年3月
中村茂樹、沼部英雄、藤巻朗

"Observing the quantum non-locality in the state $|01\rangle+|10\rangle$ of a massive particle"

Noise Information and Complexity @ Quantum Scale, 4-10 November 2007, Erice, Italy.

Koji Maruyama

"Reversible logic circuits as prototypes of prospective quantum computers"

Plenary talk at International symposium "Quantum Informatics 2007" Moscow, Zvenigorod, Russia, Oct. 3-5 2007.

V.K. Semenov, J. Ren and D.V. Averin,

"量子ビット読み出し用 マイクロ波 dc-SQUID の開発"

電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会 2007年10月

T. Miyazaki, T. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Yorozu, M. Hidaka and J. S. Tsai

"dc SQUID amplifiers for readout of quantum bits"

The Third CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity 2007, Oct. 2007

T. Miyazaki, T. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Yorozu, M. Hidaka and J. S. Tsai

"Reversible circuits as prototypes for prospective quantum computers"

Oral presentation at Superconductor Electronics Workshop, Lakeville, CT, USA, Oct. 2007.

V.K. Semenov, Jie Ren, D.V. Averin,

“PTL でシャントされた接合を用いた SFQ 発振器の安定化 II”

2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会、4a-ZH-10、北海道工業大学、2007 年 9 月
齊藤裕一郎、山梨裕希、吉川信行

“量子ビット読み出し SFQ 回路におけるアンシャント接合のタイミングジッタ評価”

2007 年秋季応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、2007 年 9 月
中村茂樹、沼部英雄、藤巻朗

“質量のある粒子の非局所性”

日本物理学会年次大会、21-24 September 2007、北海道大学
丸山耕司

“ジョセフソンインダクタンスによって結合した超伝導電荷量子ビットにおけるスペクトロスコピー測定”

日本物理学会年次大会、21-24 September 2007、北海道大学
山本剛、渡部道生、Yuri Pashkin、Oleg Astafiev

“量子ビット非破壊読み出しのための超伝導非線形共振器 –回路設計–”

日本物理学会年次大会、21-24 September 2007、北海道大学
渡部道生、松葉一顕、猪股邦宏、山本剛、中村泰信、蔡兆申

“量子ビット非破壊読み出しのための超伝導非線形共振器 –作製と評価–”

日本物理学会年次大会、21-24 September 2007、北海道大学
猪股邦宏、松葉一顕、渡部道生、山本剛、中村泰信、蔡兆申

“可変結合を持つ2つの磁束量子ビットの量子状態操作”

日本物理学会年次大会、21-24 September 2007、北海道大学
吉原文樹、Antti O. Niskanen、Khalil Harrabi、中村泰信、蔡兆申

“量子計算システム応用に向けたアンシャント接合による SFQ 回路の検討”

第 54 回応用物理学関係連合講演会、青山学院大学、神奈川、2007 年 3 月。
沼部英雄、寺部雅能、藤巻朗

“パイ接合を利用した quiet qubit のデコヒーレンス評価”

日本物理学会、鹿児島大学、2007 年 3 月 18 日
加藤岳生、A. A. Golubov

“高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を用いた量子ビットのデコヒーレンス評価”

日本物理学会、鹿児島大学、2007 年 3 月 18 日
梅木孝憲、加藤岳生、田仲由喜夫、川畑史郎、柏谷聡、浅野泰寛

“Forster-type mechanism of the redox-driven proton pump.”

Talk at the annual meeting of American Physical Society, Denver, Colorado, March 6, 2007.

L.G. Mourokh, A.Yu. Smirnov, and Franco Nori,

“SFQ 回路を用いた量子ビット操作マイクロ波チップの設計”

2007 年春季第 54 回応用物理学関係連合講演会、27a-ZV-1、青山学院大学、2007 年 3 月。

松田 剛、山梨裕希、浅野高司、吉川信行

“PTL でジャントされた接合を用いた SFQ リング発振器の安定化”

2007 年春季第 54 回応用物理学関係連合講演会、27p-A-8、青山学院大学、2007 年 3 月。
斎藤裕一郎、吉川信行

“Study of LR-Loading Technique for Low-Power Single Flux Quantum Circuits”

Abstract of 2006 Applied Superconductivity Conference, Seattle, USA, Sep.2006
Y. Yamanashi, T. Nishigai, N. Yoshikawa

“Design of an SFQ Microwave Chopper for Controlling Quantum Bits”

Abstract of 2006 Applied Superconductivity Conference, Seattle, USA, Sep.2006
G. Matsuda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa

“SFQ回路を用いたDC駆動型電圧パルス発生器の研究”

2006 電子情報通信学会総合大会、金沢大学、2006 年 9 月
山梨裕希、吉川信行

“Towards tunable coupling of optimally biased flux qubits”

近畿大学 講演会、大阪、2006 年 9 月
Antti Niskanen

“Discrimination between different sources of decoherence in flux qubit”

Vietnam 2006, Hanoi, Vietnam, Aug.2006
K. Harrabi, F. Yoshihara, A. Niskanen, Y. Nakamura, J. S. Tsai

“Timing jitter measurement in single-flux-quantum circuits based on time-to-digital converters with high time-resolution”

Applied Superconductivity Conference 2006, Seattle, USA, Aug.2006
M. Terabe, A. Sekiya, T. Yamada, A. Fujimaki

“低消費電力型単一磁束量子回路の低温動作測定”

2006年秋応用物理学学会学術講演会、立命館大学、2006 年 8 月
浅野高司、松田剛、山梨裕希

“High-Resolution Analog-to-Digital Converter toward Multiple Detectors System”

Applied Superconductivity Conference 2006, Seattle, USA, Aug.-Sep.2006
A. Fujimaki, A. Sekiya, Y. Nishido, T. Yamazaki, H. Sato, H. M. Shimizu

“量子ビット用マルチチップモジュールへの SQUID 応用”

超伝導エレクトロニクス研究会、東京、2006 年 7 月
宮崎利行、萬伸一、前澤正明、日高睦夫、蔡兆申

“超伝導量子ビット周辺回路のための SFQ 回路の低消費電力化の検討”

2006 年春季応用物理学学会学術講演会、武蔵野工業大学、2006 年 3 月
山梨裕希、西海尚伸、吉川信行

“2重発振器を用いた遅延測定回路の精度向上のための検討”

2006 年春季応用物理学学会学術講演会、武蔵野工業大学、2006 年 3 月

中宮和徳、西海尚伸、吉川信行

“SFQ 回路を用いた量子ビット操作用マイクロ波発振器の設計”

2006 年春季応用物理学会学術講演会、武蔵野工業大学、2006 年 3 月
松田剛、山梨裕希、吉川信行

“膜厚によって超伝導ギャップを制御した超伝導単電子トランジスタにおけるパリティ効果”

日本物理学会第61回年次大会、愛媛、2006 年 3 月
山本剛、中村泰信、Yuri Pashkin, Oleg Astafiev, 蔡兆申

“磁束量子ビットのデコヒーレンスの温度依存性”

日本物理学会第61回年次大会、愛媛、2006 年 3 月
吉原文樹、Khalil Harrabi, 中村泰信、蔡兆申

“超伝導量子ビット操作のための SFQ 回路の低消費電力化の研究”

電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会 SCE2005-25、東京、2006年1月
山梨裕希、西海尚伸、吉川信行

“時間／デジタル変換器を用いたタイミングジッタの検討”

第 66 回応用物理学会学術講演会、徳島、2005 年 9 月 7 日
寺部雅能、関谷彰人、藤巻朗

“超伝導量子ビット操作のためのオンチップマイクロ波発生器の提案”

2005 電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-8-7、北海道大学、2005 年9月
山梨裕希、浅野高司、中宮和徳、吉川信行

“ジョセフソンマイクロ波チョッパの伝送特性の測定”

2005 年秋季応用物理学会学術講演会、徳島大学、2005 年 9 月
松田剛、山梨裕希、吉川信行

“磁束量子ビットのデコヒーレンス1”

日本物理学会2005年秋季大会、京都市、2005 年 9 月
吉原文樹、Khalil Harrabi, 中村泰信、蔡兆申

“磁束量子ビットのデコヒーレンス2”

日本物理学会2005年秋季大会、京都市、2005 年 9 月
吉原文樹、Khalil Harrabi, 中村泰信、蔡兆申

“広帯域高精度アナログ／デジタル変換器の開発とソフトウェア無線への展開”

応用物理学会超伝導分科会第 31 回研究会、東京、2005 年 6 月 24 日
藤巻朗、西土佳典、関谷彰人

“LRロードによる低消費電力型SFQクロックジェネレーターの試作”

応用物理学会関係連合講演会、埼玉大学、2005 年 3 月
山田彰悟、西海尚伸、山梨裕希、吉川信行

“ジョセフソン接合を利用したマイクロ波チョッパの設計”

応用物理学会関係連合講演会、埼玉大学、2005 年 3 月
松田剛、山梨裕希、吉川信行

“Measurement of Quantized Energy Levels in a Josephson Junction Using Single Flux Quantum Circuits”

Proceeding of 2005 Japan-Taiwan Symposium on Superconductive Electronics, Sapporo, Hokkaido, Feb.2005

N. Yoshikawa, Y. Yamanashi

“SFQ 回路におけるタイミングジッタの定量的評価”

電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会 SCE2005-22, 名古屋, 2005 年 10 月 14 日
寺部雅能, 関谷彰人, 藤巻朗

“Integration of a prototype cryopackage with cryocooler for large-throughput superconducting digital systems”

ISEC 2005, Noordwikerhout, Netherlands

S. Yorozu, Y. Hashimoto, T. Miyazaki, Y. Kameda, H. Kojima, N. Yoshikawa, H. Suzuki

“Demonstration of Multi-bit Sigma-Delta A/D Converter with the Decimation Filter”

2004 Applied Superconductivity Conference, Jacksonville, Florida, USA, Oct. 12, 2004.

A. Sekiya, K. Okada, Y. Nishido, A. Fujimaki, H. Hayakawa

“Multi-bit Sigma-Delta Analog-to-Digital Converter Based on Single Flux Quantum Circuit”

17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004), Niigata, Nov. 24, 2004.

A. Sekiya, Y. Nishido, A. Fujimaki

“単一磁束量子回路を用いたジョセフソン接合の量子化エネルギー準位の観測”

2004 年秋季応用物理学学会学術講演会、東北学院大学、2004 年 9 月

山梨裕希、松田剛、田上暁之、吉川信行

“単一磁束量子回路を用いたジョセフソン接合のエネルギー準位の量子化の観測”

電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会 SCE2004-22、東京、2004 年 7 月

山梨裕希、田上暁之、吉川信行

“SFQ回路を用いたジョセフソン接合の量子化エネルギー準位の観測”

2004 年春期応用物理学学会学術講演会、東京工科大学、2004 年 3 月

山梨裕希、田上暁之、吉川信行

“超伝導マルチビット ΔAD 変換器 (デバイス・一般)”

電子情報通信学会技術報告, SCE2003-36, pp. 47-52, 2004.

関谷彰人, 岡田清和, 藤巻朗, 早川尚夫

③ポスター発表 (国内会議 5 件、国際会議 20 件)

“Ac-signal controlled couplings in superconducting flux qubits”

ISQM-TOKYO'08, Saitama, Japan Aug.25-28, 2008

Yuxi Liu and Franco Nori

"Entanglement purification by unmodulated spin chains and single spin measurement"

ISQM-TOKYO'08, Saitama, Japan Aug.25-28, 2008

Koji Maruyama and Franco Nori

"Single-artificial-atom lasing and its suppression by strong pumping"

ISQM-TOKYO'08, Saitama, Japan Aug.25-28, 2008

R.Johansson, S.Ashhab, A. Zagoskin and Franco Nori

"SFQ Single-Shot Readout Circuit for a Flux Qubit Based on Current-to-Time Conversion"

2008 Applied Superconductivity Conference, Chicago, Illinois USA, August 17 - 22, 2008.

S. Nakamura, H. Numabe, A. Fujimaki

"スピン・軌道相互作用によるエンタングルメント輸送"

第3回量子情報未来テーマ開拓研究会, 28 August - 7 September 2007, 知念, 沖縄

丸山耕司

"Development of Short-Line-Width On-Chip Microwave Generators for Controlling Superconducting Qubits"

Superconducting SFQ VLSI Workshop 2008, P2-7, Yokohama National University, Japan, Mar. 2008.

Y. Saito, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa

"Metal beams as high frequency nanomechanical resonators"

Gordon Research Conference "Mechanical systems in the Quantum Regime", 17-22 Feb., 2008, Ventura, USA

Yuri A. Pashkin

"Timing jitter of a readout SFQ circuit for flux qubits based on current-to-time conversion"

2007 European Conference of Applied Superconductivity, Brussels, Belgium, Sept. 2007.

H. Numabe, S. Nakamura, M. Terabe, A. Fujimaki

"Low power consumption SFQ circuits for quantum bit"

8th European Conference on Applied Superconductivity, Sep. 2007.

T. Miyazaki, Irina Kataeva, S. Yorozu, M. Hidaka and J. S. Tsai

"dc SQUID amplifiers for readout of quantum bits"

8th European Conference on Applied Superconductivity, Sep. 2007

T. Miyazaki, T. Yamamoto, Y. Nakamura, S. Yorozu, M. Hidaka and J. S. Tsai

"Stimulus and read-out interfaces for nSQUID arrays"

Poster presentation at ISEC, Washington DC, June 2007

V.K. Semenov and J. Ren

"Study on a DC-powered On-chip Voltage Generator Using SFQ Circuits"

19th International Symposium on Superconductivity, Nagoya, Oct.2006

Y. Yamanashi, N. Yoshikawa

“Development of SFQ multichip modules for quantum-bits”

Applied Superconductivity Conference, Seattle, US, Aug.2006

T. Miyazaki, S. Yorozu, M. Maezawa, M. Hidaka, J. S. Tsai

“Single flux quantum circuit and packaging technology for sub-Kelvin temperature operation”

Applied Superconductivity Conference, Seattle, US, Aug.2006

S. Yorozu, J. S. Tsai, T. Miyazaki, V. Semenov, M. Hidaka

“Tunable coupling scheme for flux qubits at the optimal point”

International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, Atsugi, Feb.-Mar.2006

A.O. Niskanen, Y. Nakamura, J. S. Tsai

“Decoherence and noise sources in Flux Qubit”

International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, Atsugi, Feb.-Mar.2006

F. Yoshihara, K. Harrabi, Y. Nakamura, J. S. Tsai

“Sub-Kelvin single flux quantum control circuits and multi-chip packaging for supporting superconducting qubit”

EUCAS 2005, Vienna, Austria

S. Yorozu, T. Miyazaki, V. Semenov, Y. Nakamura, Y. Hashimoto, K. Hinode, T. Sato, Y. Kameda, J. S. Tsai

“The Current Resolution of SFQ Balanced Comparators”

EUCAS 2005, Vienna, Austria

T. Miyazaki, S. Yorozu, M. Hidaka, Y. Nakamura, J. S. Tsai

“Design of the microwave chopper for superconducting qubits”

Abstracts on 18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005), Tsukuba, October 2005, pp.329.

G. Matsuda, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa

“Design and implementation of low-power SFQ circuits using Ir-load-biasing technique”

Abstracts on 18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005), Tsukuba, October 2005, pp.329.

T. Nishigai, S. Yamada, N. Yoshikawa

“On-chip microwave generator for manipulation of superconductive quantum bits”

Abstracts on 18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005), Tsukuba, October 2005, pp.330.

Y. Yamanashi, T. Asano, N. Yoshikawa

“Demonstration of High-Performance Analog-to-Digital Converter with Complementary Structure,”

10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2005), Noordwijkerhout, The Netherlands, Sept. 5-9, 2005.

Y. Nishido, A. Sekiya, A. Fujimaki

“Evaluation of the Resolution of the Time-to-Digital Converter for Single-Shot Readout of the Flux Qubit”

10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2005), Noordwijkerhout, The Netherlands, Sept. 5-9, 2005.

A. Sekiya, T. Yamada, M. Terabe, A. Fujimaki

“Measurement of Decoherence Time in a Flux Qubit”

24th International Conference on Low Temperature Physics, Orlando, USA, Aug. 2005

K. Harrabi, Y. Nakamura, A. Niskanen, J. S. Tsai

“Demonstration of Multi-bit Sigma-Delta A/D Converter with the Decimation Filter,”

2004 Applied Superconductivity Conference, Jacksonville, Florida, USA, Oct. 12, 2004.

A. Sekiya, K. Okada, Y. Nishido, A. Fujimaki, H. Hayakawa (Nagoya University)

(3)特許出願

①国内出願 (2件)

1. 発明の名称: 量子ビット可変結合方法及びそれを適用した量子演算回路、並びに可変結合器

発明者: Antti Olavi Niskanen、萬伸一

出願人: 科学技術振興機構、NEC

出願日: 2006.09.05

出願番号: 特願 2006-239821

2. 発明等の名称: 信号増幅回路及び方法

発明者: 萬伸一 (日本電気株式会社)

宮崎 利行 (独立行政法人 科学技術振興機構)

出願人: 日本電気株式会社 (持分比率 50%)

独立行政法人 科学技術振興機構 (持分比率 50%)

出願日: 平成20年01月31日

出願番号: 特願2008-020101

②海外出願 (1件)

1. 発明の名称: 量子ビット可変結合方法及びそれを適用した量子演算回路、並びに可変結合器

発明者: Antti Olavi Niskanen、萬伸一

出願人: 科学技術振興機構、NEC

出願日: 出願手続中

出願番号:

(4)受賞等

① 受賞

蔡兆申・中村泰信 2008年サイモン記念賞 8月1日2008年
「世界で初めて巨視的な物理系である超伝導固体素子上で量子コヒーレント状態を実現し、固体素子を用いた量子コンピュータ実現の可能性を示したこと、および量子コヒーレント物理の研究成果」

Yu-xi Liu Frontier Research System Award for Excellent Research 2007年
フロンティア研究システム 奨励賞

Franco Nori Elected Fellow of the American Association for the Advancement of Science (AAAAS), USA 2007年
アメリカ科学振興協会フェロー就任

中村泰信 Agilent Technologies Europhysics Prize 6月22日2006年
“Demonstration of quantum bits using superconducting circuits”
共同受賞者 Daniel Esteve (CEA Saclay),
Hans Mooij (TU Delft),
Michel Devoret (Yale University)

山本剛 理研フロンティア研究システム賞大賞 5月12日2006年
“ジョセフソン接合回路を使った量子論理ゲートの実現”

蔡兆申 仁科賞 12月16日2004年
“ジョセフソン接合素子を用いた2個の量子ビット間の量子もつれ状態の実現”

山本剛 Technology Review 100 (MIT TR100) 2004年

蔡兆申・中村泰信・山本剛 NEC社長賞 (NEC Presidential Award) 2004年

②新聞報道

NEC

日付	タイトル	新聞社名
H20.8.4	低温物理学のサイモン記念賞 蔡氏・中村氏(NEC)受賞	日刊工業新聞
H20.8.4	08年「サイモン記念賞」を受賞 NEC ナノエレクトロニクス研の2人	電波新聞
H19.10.4	理研など 単一「人口原始」でレーザー発振成功 量子計算などへ適用可能	科学工業日報
H19.10.4	レーザー 人工原子1個で作製 理研など超電導利用 マイ	日経産業新聞

	クロ波源に応用	
H19.10.4	理研とNEC 超電導量子ビット使用 人工原子でレーザー発振 量子コンピューターに応用期待 集積化容易、単光子源にも	日刊工業新聞
H19.9.5	半導体進化論 イノベーター列伝 第6部フロンティア再び5 量子で計算機を変革 5つの手法 本命まだ	日経産業新聞
H19.8.29	半導体進化論 イノベーター列伝 量子コンピューターに道 NEC、基本回路を試作	日経産業新聞
H19.5.21	NEC Team Makes Quantum Circuit with Adjustable Coupling	Superconductor Week
H19.5.18	演算素子結ぶ「結合器」	朝日新聞
H19.5.18	量子コン実現へ前進 統合制御可能な量子ビット 独自の原理で実証成功 NEC,JST,理研の研究グループ	化学新聞
H19.5.14	量子コンピューター実現へ NEC/JST/理研 量子ビット制御技術を開発 アルゴリズム摘要可能に	日本情報産業新聞
H19.5.9	「量子ビット」の制御技術を開発	毎日新聞
H19.5.7	NECなど 量子ビットを可変結合 重ね合わせ時間100マイクロ秒へ30個接続も視野	化学工業日報
H19.5.5	NECと理研 量子ビット制御に成功 量子コンピューターへ前進	日刊工業新聞
H19.5.5	Team makes circuit for quantum computer	The Daily Yomiuri
H19.5.4	超高速計算機の基本回路を開発 NECなど	読売新聞
H19.5.4	量子コンピューター 素子の連結制御-NECなど実用化へ近づく	日本経済新聞
H19.5.4	NEC/JST/理研 量子ビット可変式結合回路を開発 「量子コンピューター」実現に近づく	電波新聞
H16.1.26	研究所の研究 NECの反攻 下 スター研究者は続くか	日経産業新聞
H15.10.30	NEC, Riken Succeed in Logic Gate Operation for Quantum Computers	Jiji Press English News

H15.10.30	量子コンピューター基本素子開発 NECなど 数千年かかる計算 1 分で	読売新聞
H15.10.30	究極のスパコン 量子コンピューター 基礎回路を開発 NEC/理研、共同で	朝日新聞
H15.10.30	量子コンピューター 理化学研など基本回路を開発	産経新聞
H15.10.30	量子コンピューター 論理回路を開発 固体で世界初、NEC Cなど	日経産業新聞
H15.10.30	超高速の量子コンピューター NEC論理回路開発 理研と 共同	日本経済新聞
H15.10.30	量子コンピューター 世界初の論理演算回路を実働 NECと理研 基本素子を 2 個結合 実現の 1 合目が近づく	電波新聞
H15.10.30	量子演算回路の原型完成 NECと理研 集積可能な固体 素子で 量子計算機に一步前進	日刊工業新聞
H15.10.30	NEC 理研 量子コンピューター2 ビット回路動作に成功 固体素子で実現可能性	日本工業新聞
H15.10.30	基本演算回路を初実現=夢の「量子コンピューター」-NEC C・理研	時事通信BRAIN
H15.8.14	独創研究集団 理研の最前線 量子コンピューターを実現 に向けた新しい電子集積回路を提唱	日刊工業新聞
H15.4.20	見えない世界が高速計算 新型計算機構想 量子力学を 応用	日本経済新聞
H15.4.12	見えた! 量子コンピューターの可能性 スパコン 1 千万年 前も瞬時 「重ね合わせ」で暗号を一発解読	朝日新聞
H15.4.11	量子コンピューター向け 電気の雑音に強い新素子 NEC とデルフト大 超電導回路で実現	日経産業新聞
H.15.2.25	夢の計算機に道 電子素子を開発 NEC と理研	読売新聞
H15.2.24	量子コンピューター基礎回路開発 多様な用途、研究競う	日本経済新聞
H15.2.20	数千年かかる計算数十秒で 量子コンピューターへ前進 理研など基礎技術達成	産経新聞
H15.2.20	量子コンピューターへ前進 NECと理研が基本回路開発	毎日新聞

H15.2.20	スーパーコンで数十億年の計算数秒で 量子コンピューター基礎回路を開発 NEC理研実現へ一歩	日本経済新聞
H15.2.20	量子計算機の基礎回路開発 素子作りの段階に	日本経済新聞
H15.2.20	固体2量子ビット絡み合い実験に成功 NECと理研 量子計算機へ前進	日刊工業新聞
H15.2.20	NEC・理研 基礎回路を実現 量子コンピューター向け	日経産業新聞
H15.2.20	NEC理研 固体素子で実現 量子ビットの「絡み合い」	日本工業新聞
H15.2.20	理研とNEC 固体素子用いて2ビットの「量子絡み合い」を実現 量子コンピューター開発へ大きく前進	電波新聞
H15.2.20	量子計算機の実現に道 NECと理研が新技術	共同通信ニュース
H15.2.20	夢のコンピューターへまた一歩＝「量子絡み合い」実現－NECと理研	時事通信BRAIN
H15.2.19	Japan's NEC Takes Step Forward in Quantum Computing	REUTERS
H14.11.19	量子IT実現の道―第一人者に聞く IC、超電導素子で 実用規模の計算に光	日経産業新聞
H14.11.8	量子コンピューター実現に向け 理研 量子ビットを効率的に集積 新たな電子回路提唱	化学新聞
H14.10.25	量子計算機用IC設計 NECと理研、実現へ一歩	日本経済新聞
H14.10.24	理研 量子ビット数百個結合回路を考案	日本工業新聞
H14.10.24	超電導固体素子利用 数百ビット扱える電子回路 理研が提案 量子計算機実現へ実証	日刊工業新聞
H14.1.4	未来はこうなる 量子コンピューター 計算量の壁打ち破る	日本経済新聞

RIKEN

2008: July 28: Superconductor Week (page 6), RIKEN Proposes Method to Improve Quantum Coherence. Featured our paper on "Simultaneous Cooling of an Artificial Atom and Its Neighboring Quantum System", Phys. Rev. Lett. **100**, 047001 (2008)

2008: Optical Society of America (OSA) workshop on Entanglement and Quantum Decoherence (EQD). Nara, Japan. January 2008. F. Nori was a co-organizer and its USA-Japan liason. Six collaborators presented results here.

2008: The research done in the group of Prof. Nori is prominently featured in an article (published January 31, 2008) in "Il Sole 24 Ore", the most important economic/financial newspaper in Italy.

2007: Prof. F. Nori elected fellow of the American Association for the Advancement of Science (AAAS). Ten from University (of Michigan) chosen as AAAS Fellows, AAAS Members Elected as Fellows, Honors to physicists at RIKEN

2007: News coverage on our research, in Russian.

2007: News coverage on our research, in Russian, "Physicists have created a model of biological nanomotors"

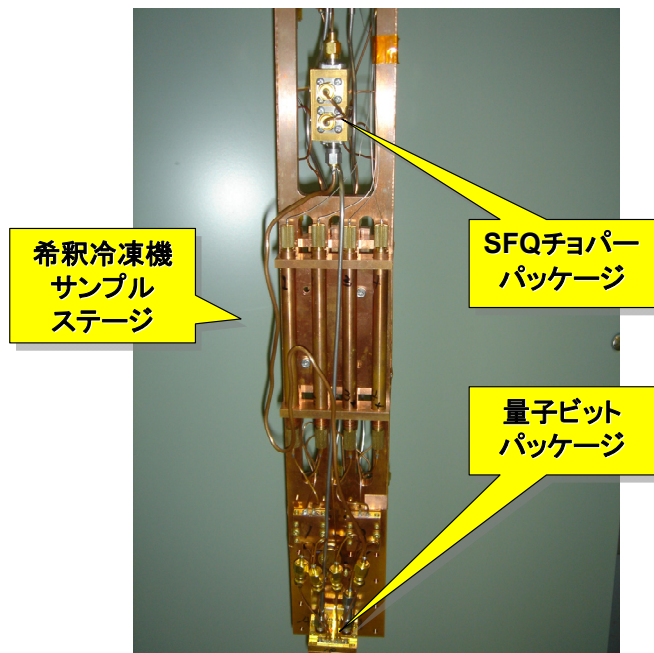
2007: Riken Research News, Profile of Prof. Franco Nori, "Taming Quantum Fluxes" 2007: Riken Research News, "Driving for smaller engines"

§7 研究期間中の主な活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2003年12月16日	CREST チーム内会議	日本電気(株) 基礎・環境研究所	5名	CRESTプロジェクト打ち合わせ
2004年2月12日	CREST チーム内会議	日本電気(株) 基礎・環境研究所	6名	CRESTプロジェクト打ち合わせ
2004年4月2日	CREST チーム内会議	日本電気(株) 基礎・環境研究所	8名	技術討議
2004年7月12日	CREST チーム内会議	日本電気(株) 基礎・環境研究所	9名	技術討議
2004年10月12日	CREST チーム内会議	日本電気(株) 基礎・環境研究所	9名	技術討議
2005年6月1日	CREST チーム内会議	日本電気(株) 基礎・環境研究所	11名	技術討議
2005年11月21日	CREST チーム内会議	日本電気(株) 基礎・環境研究所	12名	技術討議
2006年6月30日	CREST チーム内会議	日本電気(株) 基礎・環境研究所	15名	技術討議
2006年11月7日	CREST チーム内会議	日本電気(株) 基礎・環境研究所	16名	技術討議
2007年5月30日	CREST チーム内会議	日本電気(株) ナノエレクトロニクス研究所	23名	技術討議
2007年11月14日	CREST チーム内会議	日本電気(株) ナノエレクトロニクス研究所	18名	技術討議
2008年9月26日	CREST チーム内会議	日本電気(株) ナノエレクトロニクス研究所	13名	技術討議

§8 結び

研究期間中、実りの多い研究成果を上げることが出来、全般的には当初の研究目標の多くが達成された。量子ビットの集積化や超寿命化に対しいくつかの大きな進展達成した。例えば磁束量子ビットのデコヒーレンスの要因特定と、オンオフ可能な結合器を持つ2量子ビット系での複数ステップの量子操作(量子プロトコル)の実行などである。量子ビットをサポートする超伝導周辺回路においても多くの進展を得た。低消費電力型のSFQ回路の開発、SFQマイクロ波チョッパーの開発、超伝導MMICの開発などである。量子ビット読み出し回路として、高速SFQ読み出しのノイズ解析や、広帯域SQUIDアンプの開発、ジョセフソンパラメトリックアンプの開発なども行った。超伝導量子ビットと周辺回路を組み合わせた動作はまだ残念ながら遂行できていない。実現したSFQマイクロ波チョッパーを使って量子ビット駆動する実験を準備中であり、本CRESTの終了するH21年3月までには結果を得たい。また超伝導周辺回路を使った読み出しの実験も、引き続き研究していく計画である。



左の写真は、現在準備中の超伝導量子ビットシステム実験装置。希釈冷凍機の混合チャンバー温度にあるサンプルステージに、SFQマイクロ波チョッパーの入ったパッケージと、磁束量子ビットの入ったパッケージを、マイクロ波同軸線でつなぎ、配置してある。実際の実験は今年度中に行う予定。

右の写真は、定期的にNEC つくば研究所で行われてきた研究チーム内の研究会議での写真。各グループの研究者が毎回集まり、共同研究の打ち合わせと情報交換を行ってきた。

