


SISミキサを用いた革新的非相反集積回路素子の実現

	研究代表者	国立天文台・先端技術センター・教授 鶴澤 佳徳（うざわ よしのり） 研究者番号:00359093
	研究課題情報	課題番号：22H04955 研究期間：2022年度～2026年度 キーワード：SISミキサ、非相反回路、ジョセフソン発振器、集積回路、量子計算機

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

量子雑音限界の電磁検出感度を有する超伝導体—絶縁体—超伝導体（SIS）ミキサは、電波望遠鏡用受信機に広く用いられている（図1左上）。観測効率を飛躍的に高めるために、SISミキサをカメラ画素のように2次元的に大規模配置する研究が世界的に進んでいる（図1右上）。受信機構成部品のうち、アイソレータに代表される非相反回路素子は、ファラデー効果による磁性体を用いており（図1左下）、原理的に微小化が困難であるため、大規模化を阻む要因となっている。超伝導量子コンピュータなどの研究分野においても同様の課題がある。

本研究では、SISミキサを用いた斬新な非相反集積回路素子を提案する（図1右下）。複数のSISミキサを周波数アップコンバータおよびダウンコンバータとして使い、各ミキサへ印加するミリ波帯局発振波(LO)や信号を移相回路で制御することにより非相反性を発現させ、これまでにない広帯域特性を追求する。このために、導波管モジュールを用いた移相回路やSISミキサなどで非相反回路を設計・試作し、実験と理論解析を行うことで、性能追及のための基礎動作特性を明らかにする。LO源を集積化するためにジョセフソン発振器を開発すると共に、非相反集積回路を実現するための超伝導ミリ波平面回路設計・作製技術を開発する。最終的にジョセフソン発振器とSISミキサをモノリシック集積化した革新的な非相反回路素子の性能実証を試みることで、本提案の有用性を明確にする。

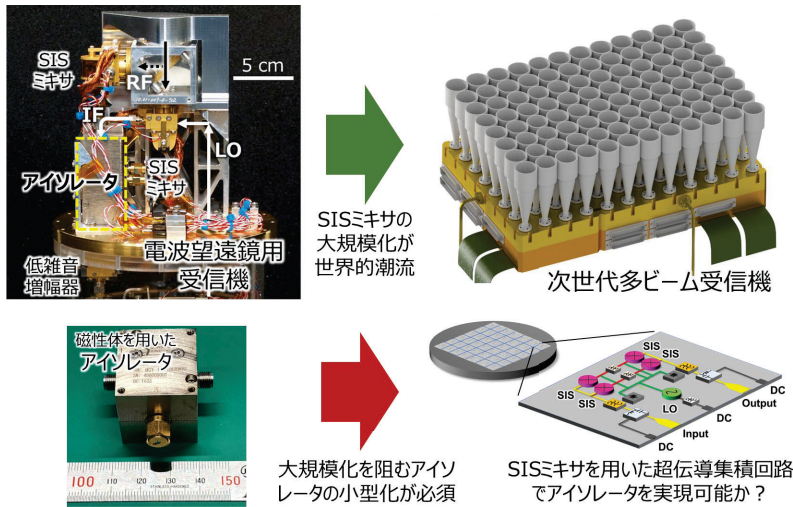


図1 本研究の全体像（上）研究背景と（下）学術的問い

●研究の手法（研究計画・方法等）

電気回路による非相反性の発現は、図2(a)に示すジャイレータが重要な役割を果たす。ジャイレータとは、2端子対回路において信号が入力端子から出力端子へ伝わる場合の位相推移と逆に伝わる場合の位相推移の差が180度になる機能回路である。図2(b)に示すように、周波数変換損失のないアップコンバータおよび

ダウンコンバータ、移相回路などを用いることで、ジャイレータを実現できる。本研究では、この両コンバータに、量子雑音性能と周波数変換利得も可能なSISミキサを用いることを提案する。

我々は、2018-2020年度において実施した科研費基盤研究Aの研究課題18H03881の「SIS接合における量子論的周波数アップコンバージョン過程の探求と応用」によって、世界に先駆けてSISミキサの低雑音アップコンバータ動作を明らかにし、さらに、従来のSISダウンコンバータと組み合わせた独創的な低雑音・低消費電力のマイクロ波増幅にも成功した（図3左）。本研究では、これをさらに発展させ、移相回路などの付加や、並行して開発するジョセフソン発振器をLO源とすることで、ジャイレータを実現する（図3中央）。回路的工夫によりアイソレータ動作を実証し、その知見を超伝導集積回路の設計に反映する。ジョセフソン発振器とSISミキサをモノリシックに集積化する作製プロセスを国立天文台クリーンルームで開発し、最終的に図3右に示すような非相反集積回路素子の実現を目指す。

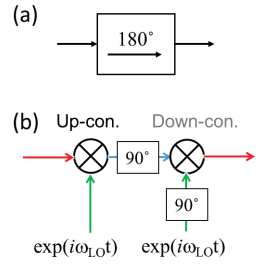


図2 ジャイレータ (a)表記と(b)ミキサによる回路

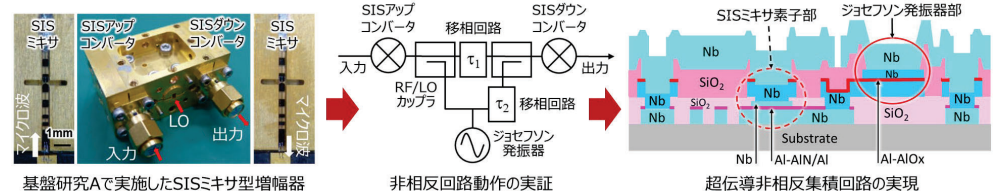


図3 SISミキサを用いた増幅器から超伝導非相反集積回路への発展

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●学術的成果

1. 超伝導SISミキサを用いた電気回路によって、非相反性を発現させる
2. 超伝導ジョセフソン発振器を非相反回路のLO源として動作させる
3. ミキサ、発振器をモノリシックに集積化することによって、超伝導非相反集積回路を実現する

●波及効果等

磁性体不要の非相反回路素子により、超伝導エレクトロニクスにおける大規模化問題が抜本的に解決されることで、世界的に競争となっている超伝導量子計算機やSISミキサなどの大規模化の研究が、我が国において一気に加速されることが期待される。このように、高周波回路システムに必要な非相反回路機を超伝導集積回路で発現することは、超伝導エレクトロニクス分野に新たな扉を開くものであり、高い創造性を有している。これにより、天文学などの基礎科学分野の発展に貢献するだけでなく、大規模量子計算機などの実現により、エネルギー問題などの社会的諸課題を解決することに大きく寄与することが期待される（図4）。

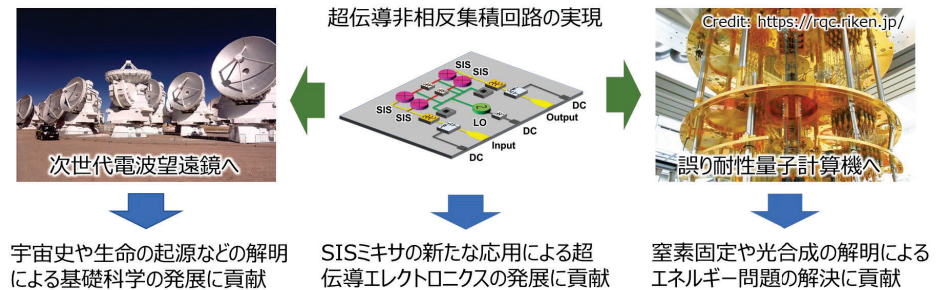


図4 本研究の実施により期待される波及効果