

超伝導コンポジットラボ (Superconducting Composite Lab.)

研究項目及び研究期間

超伝導コンポジットデバイスの基礎研究 (平成9年度～14年度)

素子の高性能化及び配列に関する研究 (平成9年度～13年度)

1. はじめに

現在の情報化社会を支える電子デバイスは、シリコンを代表とする半導体デバイスであり、将来の更なる高度情報処理を目指し、その開発が進められている。近年、半導体を持つ限界も議論されるとともに、量子効果を用いた半導体デバイスの研究がすでに始まっている。一方、半導体の限界を越えたり、半導体にはない性質をもつ材料の探索やその材料を用いた電子デバイスの可能性を追求する研究がある。その有力な候補として超伝導デバイスがある。現在、超伝導デバイスの研究には大きく2つのアプローチがある。一つは、新しい超伝導現象の探索をデバイス構造の形を形成しながら行う基礎研究と、もう一つは、超伝導素子のみならず冷凍機や室温系とのインターフェースを含めたシステムまで構築することを目指した実用化研究がある。

本ラボでは、これらを念頭に、超伝導デバイス、特に超伝導ジョセフソン素子に関する次の二つの研究テーマについて研究を進めている。「超伝導コンポジットデバイスの基礎研究」では、超高速デバイスシステムの実現を目指して、金属系超伝導回路と高温超伝導デバイスから構成される超伝導コンポジットデバイスというアイデアを提案し、その基礎技術の研究を行っている。金属系超伝導デバイスおよび高温超伝導デバイスはそれぞれ独立に研究が進められているが、これら超伝導デバイスを組み合わせたコンポジットデバイスという概念は従来ないものである。具体的には、超高速電気パルスや光パルスに対する高温超伝導デバイスの応答信号をオフチップ・ジョセフソンサンプラーを用いて精密計測および解析を行い、高温超伝導デバイスにおける未知なる新現象の発掘と超高速な超伝導コンポジットデバイスの可能性を評価することを目的とした基礎研究である。

「素子の高性能化及び配列に関する研究」では、超伝導トンネル接合(STJ)を用いた高性能X線検出器の開発を進めている。STJは、半導体に比べ原理的には約1/20の高いエネルギー分解能でX線や高エネルギー粒子を検出することができ、天文学分野、素粒子物理学分野、医療用分野への応用が強く期待されている。ここでは、STJ単体の高性能化とともに、将来の実用化にとって重要なSTJのアレイ化を目指した研究を進めている。

なお、「超伝導コンポジットデバイスの基礎研究」は、大型プロジェクト「科学技術用超高速計算システムに関する研究」でのNb系大規模集積回路(LSI)チップを用いたジョセフソンコンピュータプロトタイプETL-JC1の開発、特別研究「超伝導大規模集積化技術の研究」でのサブミクロンジョセフソン接合素子の作製技術の確立、産技プロジェクト「超伝導素子基礎技術の評価」でのYBaCuO高温超伝導積層型接合の作製技術の確立、官民連帯共同研究「ジョセフソン集積システム高速化技術に関する研究」でのジョセフソン集積回路を搭載するマルチチップモジュールの開発などの成果を基に進めている。また、「素子の高性能化及び配列に関する研究」は、科振費省際基礎研究「超伝導と高エネルギーの量子相互作用に関する基礎研究」でのSTJを用いた超伝導X線検出素子の基礎研究の成果を基にして進めている。

2. 超伝導コンポジットデバイスの基礎研究

本研究テーマでは、まず、Nb/AIO_x/Nb接合集積技術を用いて、高性能デジタル・ジョセフソンサンプリングシステムを開発した。Fig.1(a)に、本システムの基本構成図を示す。システムは、AJL論理ゲートを応用したジョセフソンサンプリング回路、デジタル遅延線、フィードバック信号検出回路、制御コンピュータから

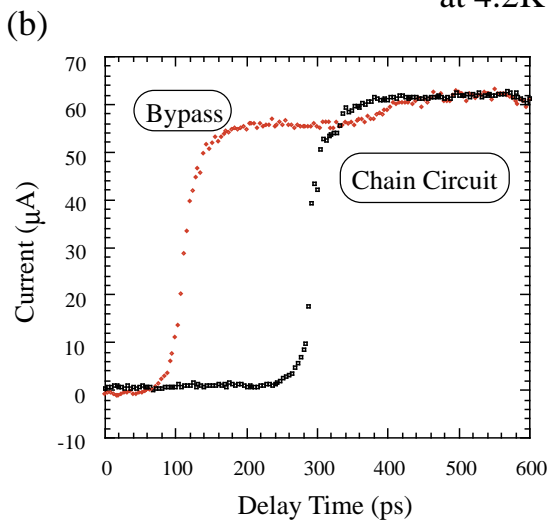
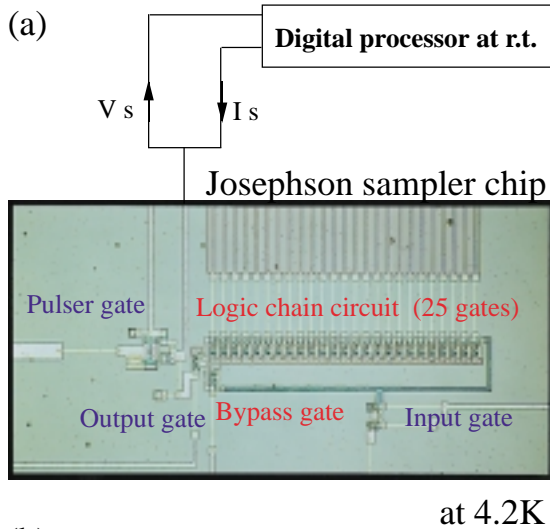
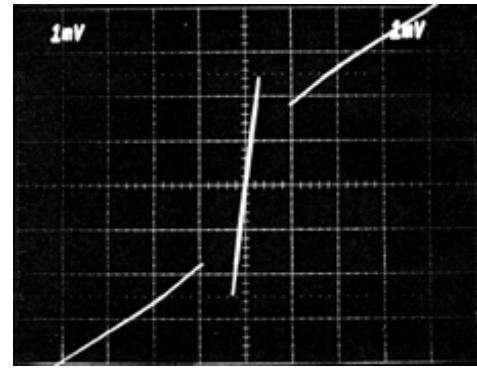


Fig.1 Nb系デジタルジョセフソンサンプリング (a) 基本構成 (b) 観測した波形

構成される。本システムを用いて、25段の4JL論理ゲートのスイッチング波形を立ち上がり時間14ps、電流感度数 μA で実測することに成功した(Fig.1(b))。また、Nb系ジョセフソンサンプラーの性能向上のため、遅延時間固定の超伝導信号遅延線路をサンプリングパルス発生源と被測定信号発生源に導入した、新しいサンプラー回路を設計・試作した。計算機シミュレーションの結果、サンプリングゲートの誤動作発生確率は大幅に低減することが確認され、測定精度、信頼性の向上に大いに寄与することが分かった。

一方、高温超伝導接合の研究では、東工大と共同して、高温超伝導SISジョセフソン接合を目指し、2-3nmの極薄PrGaO₃膜をバリアとしたa軸配向YBaCuO積層型ジョセフソン接合の作製を行った。Fig.2に作製した



(x:1mV/div., y:1μA/div.)

Fig.2 a軸配向YBaCuO/PrGaO₃(2.4nm)/YBaCuO積層型接合の電流-電圧特性

接合(PrGaO₃バリア厚:2.4nm)の電流-電圧特性を示す。接合はRSJ的電流-電圧特性を示すと同時に、臨界電流が磁場に対して周期的に変動するフラウンホーファ干渉パターンを示し、接合がジョセフソン接合であることが確認された。さらに、接合が1.5mVのヒステリシスおよび2.6mVの大きなIcRn積を持つことが分かり、PrGaO₃がトンネル接合のバリア材として有望であることを明らかにした。また、PrBaCuO膜(20nm)をバリア層としたYBaCuO積層型接合の回路応用への適応を目指し、新たにc軸配向YBaCuO積層型接合を試作し、その特性を評価した。接合に対する臨界電流の磁場依存性が周期的に変調することから、試作したc軸配向積層型接合がジョセフソン接合であることが分かった。

さらに、Nb系オフチップサンプリング技術に不可欠である、Pb/Inバンプを用いた超伝導回路用フリップチップ実装を試み、バンプ高さ4 μm 高さの狭間隔で接続させることに成功し、接続部の超伝導電流を確認することができた。

なお、現在までに、8件の特許を出願し、また、16件の論文を発表した。

3. 素子の高性能化及び配列に関する研究

本研究テーマでは、当所と理研とが連携し、エネルギー分解能向上に必要なX線検出用超伝導トンネル接合(STJ)特性の検討を行い、素子の特性を高品質化するための設計指針を得るとともに、この指針に基づき、実際の超伝導トンネル接合素子を作製し、極低温

における電流-電圧特性を評価することで研究を進めた。具体的には、 Al_2O_3 バッファ層を導入した新しい素子作製プロセス技術を考案するとともに、この技術を用いて、 $\text{Nb}/\text{AlO}_x/\text{Nb}$ 構造からなる STJ 素子を試作した結果、良好な素子特性が得られ、高品質な接合素子の作製技術として十分な見通しを得た。

さらに、将来の STJ アレイ化およびピクセル化を念頭に、STJ 上にマイクロストリップコイルを集積し、外部磁場を印加する新しい方法を提案し、素子の試作を行った。この素子の特徴としては、従来の大きな寸法をもつ磁場印加用の電磁石を不要にできること、磁場と STJ の幾何学的相対位置を確定できること、グランドプレーンを用いる超伝導マイクロストリップライン構造により平行な磁場をストリップライン近傍に集中できること、STJ 素子を磁気シールドできるので磁気トラップを防止できることなどが挙げられる。

Fig.3 に 2 個の $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ 角の方形 STJ 素子をアレイ状にマイクロストリップコイルの下に配置した素子の顕微鏡写真を示す。同図上部からマイクロストリップコイルの下を通じて $5\mu\text{m}$ 幅の Nb 配線が 2 つの方形 STJ 素子の下部電極にアースとして接続されている。上部電極配線は $4\mu\text{m}\times 4\mu\text{m}$ 角のコンタクトホールを通じて接続されている。超伝導マイクロストリップコイル ($320\mu\text{m}\times 230\mu\text{m}$) は 22 本の $2\mu\text{m}$ 幅の Nb 配線で渦巻き状に構成されている。

Fig.4 は $200\mu\text{m}\times 200\mu\text{m}$ の STJ 素子のマイクロストリップコイルに電流を流した時のフラウンホーファ特性を示す。同図で磁束量子の STJ への侵入に伴う周

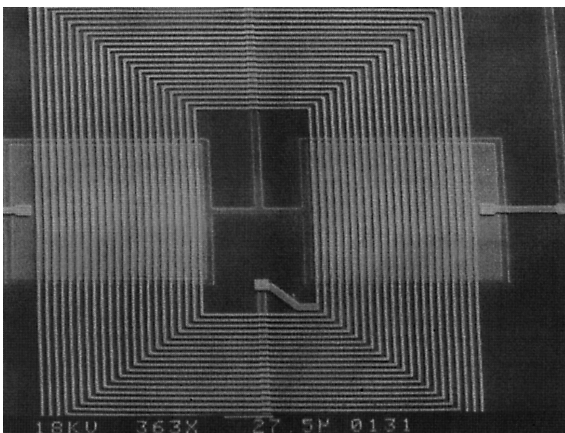


Fig.3 単一のマイクロストリップコイルの下に 2 個の超伝導トンネル接合 (STJ) を配置したアレイ素子の電子顕微鏡写真

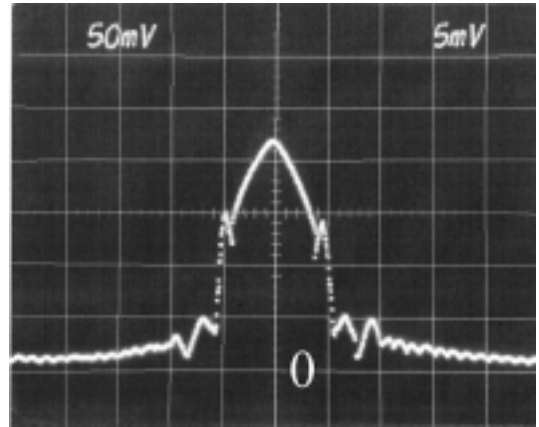


Fig.4 マイクロストリップコイルによる STJ 素子のフラウンホーファ特性 (縦軸: $5\text{mA}/\text{div}$. 横軸: $0.5\text{mA}/\text{div}$.)。素子の寸法は $200\mu\text{m}\times 200\mu\text{m}$

期的な変調が重なり合っていることからジョセフソン侵入長に比べて大きな寸法をもつ STJ の特徴をもつことが分かる。また、これらの特性から、マイクロストリップコイルによる STJ 近傍の磁場の電流依存性 ($0.26\text{mT}/\text{mA}$) が得られた。これにより、STJ を動作させるに必要な 10mT の磁場は、マイクロストリップコイル電流 38mA で得られることが分かり、この素子の有効な機能を確認することができた。

なお、現在までに 3 件の特許を出願し、また、14 件の論文を発表した。

4. おわりに

「超伝導コンポジットデバイスの基礎研究」では、Nb 系デジタル・ジョセフソンサンプリングシステム、高温超伝導積層型接合チップ、フリップチップ実装技術などの個別技術についての開発を進めた。今後、これらの技術を組み合わせ、超伝導コンポジットデバイスとしての機能を評価する予定である。これにより、超伝導デバイスの持つ新しい機能を見出すことができると期待される。

一方、「素子の高性能化及び配列に関する研究」では、今後、マイクロストリップコイル付き STJ 素子の X 線に対する応答を測定し、機能を評価する予定である。この新しい STJ 素子は、X 線検出用の STJ 素子の近傍に検出信号の信号処理を行う高速超伝導回路を近接して集積することを可能とし、X 線検出器全体の小型化、STJ 素子のアレイ化、高速動作など超伝導 X 線検

出器の高性能化が期待される。

なお、本ラボで進めている2つの研究テーマについては、独立行政法人化後、エレクトロニクス領域において、研究を展開する予定である。

当該研究担当者等

・「超伝導コンポジットデバイスの基礎研究」

1) ラボ構成員(総数7名)

職員(5名) 赤穂博司*、仲川 博、青柳昌宏、佐藤 弘
(電子デバイス部)、遠藤和弘(材料科学部)

職員以外(2名) 鯉沼秀臣、川崎雅司(東京工業大学)

2) その他の研究協力者

松本祐司、高橋龍太(東京工業大学)、宝川幸司、中島
勉(神奈川工科大学)、山本 寛、金田孝彦(日本大学)

*ラボリーダー

・「素子の高性能化及び配列に関する研究」

1) ラボ構成員(総数8名)

職員(4名) 赤穂博司*、仲川 博、青柳昌宏、佐藤 弘
(電子デバイス部)

職員以外(4名) 清水裕彦、加藤 博、佐藤広海、奥 隆
之(理化学研究所)

2) その他の研究協力者

池田時浩、宮坂浩正、大谷知行、川井和彦、渡辺 博、
滝澤慶之(理化学研究所)、石橋健二、前畑京介、田井
野徹(九州大学)、高田 進、明連広昭、飯塚武志、菊
池克弥、南目雅基(埼玉大学)

*ラボリーダー