

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクスの創製

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

藤巻 朗 (名古屋大学大学院工学研究科 教授)

主たる共同研究者

斗内 政吉(大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター 教授)

前田 京剛(東京大学大学院総合文化研究科 准教授)

3. 研究内容及び成果

本研究は、超伝導単一磁束量子回路(SFQ 回路)によるテラヘルツエレクトロニクスの基盤確立を目指し、ここで用いる高温超伝導デバイスの優位性を実証することを目標とした。高温超伝導ジョセフソン接合では作成工程の簡単なランプエッジ接合が主流であるが、ランプエッジ構造はインダクタンスが大きい、回路設計上の自由度が小さいという問題がある。本研究では、テラヘルツ SFQ 回路を実現するには積層構造接合が不可欠であると考え開発に取り組んだ。以下グループごとの研究内容と成果について述べる。

(HTS 研究グループ)

HTS 積層接合の開発

高温超伝導体は原理的には Nb 系よりも高速な回路が見込まれるが、作製された $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) を用いた接合では、予想の 1/10-1/5 程度にとどまっていた。原因として考えられるトンネル障壁界面の解析をすすめる、均質なプラズマによって下部電極のごく表面だけに損傷を与えることで良好な特性を得ることに成功した。具体的には表面改質直前に Pr や Ga を僅かに添加する方法、上部電極に $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}$ (YbBCO) を用いた欠陥形成を促進させる方法などを見出した。積層構造接合については、YbBCO を対向電極に用いた接合、 PrGaO_3 (PGO) を添加した接合、何も添加しない接合について検討した。この結果、同一臨界電流密度においてランプエッジ接合を凌ぎ、Nb による接合の材料的限界に近い、あるいはそれを越える $I_c R_n$ 積を得ることができた

特性ばらつきもランプエッジ構造とほぼ同じレベルにまで低減化でき、小規模集積回路の実現が可能となった。実際に、1/2 分周回路を試作して高温超伝導体としては世界最高周波数の約 500GHz での動作を実証し、積層構造の優位性を検証した。

ナノブリッジの作製と評価

SFQ 回路と光信号の入出力インターフェイス実現のための基盤技術として、超伝導ナノブリッジ作製方法の検討を行った。新しい作製法により、最小線幅はこれまでの報告よりも細かい 30nm、また臨界電流値は理論限界である対破壊電流に近い値を持つ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ナノブリッジの作成に成功している。このナノブリッジの最小線幅 80nm のナノブリッジを用いた量子干渉計(SQUID)の構造を形成し、磁束量子を 1 個ずつ出し入れする能力、すなわち、ジョセフソン接合と同等の機能を有することが実証された。しかしまだこれまでの報告例を超える十分な高速性が得られておらず、原因を究明中である。

Nb 回路用入出力

フォトミキシング技術を利用した高周波光入力の実証および二重積層ジョセフソン接合による出力電圧の高電圧化を図り、5GHz での単一磁束量子回路への入力に成功した。また、積層接合の特長を活かした二重接合の作製にも成功した。

(光インターフェイスグループ)

光入力インターフェイスの開発は、当初フォトダイオードなどで受光した信号を電気信号に変換する方法を試

みたが発熱による問題があり、研究の後半では、直接光を超伝導デバイスに照射し SFQ 信号を発生する手法に重点を置いた。

高温超伝導平面型ジョセフソン接合を用いた光入力素子を開発し、約 5ps のパルス幅を持つインパルス状の電圧の出力に成功し、単一の磁束量子を発生するのに最も適していることが分かった。また、100GHz 程度まで応答することも確認し、入力インターフェイス技術はほぼ整ったと考えられる。ジョセフソン素子への光照射により出力された電圧のパルス幅を観測した例はなく、これが最初の観測である。

光出力は、超伝導ループに捕らえられた磁束量子を、磁気光学効果を用いて検出する原理を用いた。現在、静止した磁束、さらに磁場の時間変化を観測するに至った。光検出器の帯域幅の関係で、周波数は 1kHz 程度にとどまっているが、今後はより広帯域の光検出器を用いることで、数十 GHz 程度まで SFQ/光変換が可能になるものとする。

(SFQ 基礎グループ)

銅酸化物超伝導体接合の両端に汚れた金属層があるようなジョセフソン接合の電流の温度依存性に関して理論計算を行った。その結果 $I_c R_n$ 積が大きくなる理由として、超伝導体界面に形成される拡散伝導領域が深刻な影響を与えるということを示した。

新規なジョセフソン接合の構造として、高温超伝導体ストリップ上にアイランド状の磁性金属を形成した構造を提案した。磁性体の持つ磁性で超伝導を破壊することにより SNS または SIS 構造を形成するものである。マイクロ波照射による干渉効果の検出、SQUID 構造の評価によりこの構造がジョセフソン接合として動作することを示した。構造が単純で作製方法が簡単であるため、将来的に集積化の容易な高性能高温超伝導体ジョセフソン接合となることが期待できる。

4. 事後評価結果

4 - 1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

本研究は、高温超伝導体を持つ高速性のポテンシャルを引き出しテラヘルツ領域での SFQ 回路実現を目指すものである。高温超伝導体では形成が比較的容易なランプエッジ構造ジョセフソン接合が主流となっているが、本研究チームでは寄生インダクタンスが小さくできるため回路の高速化に有利な独自の積層型高温超伝導体ジョセフソン接合を研究開発してきた。得られた主な成果は以下の通りである。

- [1] 積層構造ジョセフソン接合において、優れた $I_c R_n$ 積値を得るとともに、素子ばらつきを減らすことに成功し、すぐれた特性を有する SFQ 回路を構成する見通しを得た。
- [2] SFQ 回路への入出力方式がひとつの課題であるが、100GHz を越える光信号の入力に成功し、特性は不十分ながら MO 効果による出力手法が示された。
- [3] 高温超伝導体ジョセフソン接合の特性を基礎的な立場から検討により、高温超伝導体ジョセフソン接合の特性劣化要因の新しいモデルを提案した。
- [4] 近接磁性体を用いた新規ジョセフソン接合構造を提案し、ジョセフソン接合動作を検証した。

これらの成果についての発表論文数は、英文 95 件、和文 1 件、口頭発表は、国際会議 40 件、国内会議 134 件、ポスター発表は国際会議 81 件、国内会議 2 件である。この他、国際会議で 43 件、国内会議で 2 件の招待講演を行っており、本研究チームがこの分野での指導的立場にあることが分かる。また、特許は国内出願 4 件、新規ジョセフソン接合の構造に関して 1 件の外国出願を行っている。

4 - 2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

電力・遅延時間積で比較した場合、素子の特性は、基本的には半導体素子を数桁凌駕しており、本質的に超高速・超省電力のデバイスといえる。本研究では、高温超伝導体を用いても、回路の動作温度はこれまでに実績のある Nb 系と同じ極低温を想定しているため、Nb 系では困難なサブテラヘルツ動作の基礎を実証したこと

に、本研究の意義がある。積層構造のジョセフソン接合の課題を解決し高温超伝導材料による回路集積の基盤技術が立ち上げられた点は、今後のこの分野の進展に大いに貢献するものと考える。

光入出力技術はNbにも適用されているように一般の超伝導体素子にも応用可能で高い将来性が期待できる。また、微小磁性材料と組み合わせた超伝導スピントロニクスデバイスも新しい展開の可能性が期待できる。

4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

JST ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ内の10領域内の関連する研究チームが共同で開催し、国内外の研究者による合同シンポジウムを2005年度、2006年度にそれぞれ1回、2007年度には2回開催した。

受賞としては、(1) 藤巻朗：第8回超伝導科学技術賞 2004年6月、(2) 田仲由紀夫：第9回超伝導科学技術賞 2005年6月、(3) M. Inoue(共同研究者 T. Nishitani, I. Kawayama, K. Sawaki, A. Fujimaki, H. Murakami, M. Tonouchi) : Best Poster Award at the Third East Asia Symposium on Superconductive Electronics (EASSE2005), "Design and Demonstration of the Optical Input Interface for SFQ Circuits", 2005年11月18日、(4) 堂田泰史(共同研究者 川山巖、村上博成、斗内政吉) : 2006年度低温工学・超伝導関西若手奨励賞、"磁束量子フロートランジスタの光応答計測"、2006年12月7日、(5) Y. Doda (共同研究者 I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi) : Best Poster Award at 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006), "Optical response of Josephson vortex flow transistors", 2006年12月13日、が挙げられる。