

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401  
研究種目：新学術領域研究 研究課題提案型  
研究期間：2009～2011  
課題番号：21200059  
研究課題名（和文）  
単一磁束量子素子用超高速光入出力インターフェイス開発  
研究課題名（英文）  
Development of ultrafast optical interfaces for single flux quantum devices  
研究代表者  
川山 巖 (KAWAYAMA IWAO)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教  
研究者番号：10332264

## 研究成果の概要（和文）：

高温超伝導ジョセフソン接合および超伝導ブリッジの超短パルスレーザー応答を観測するため、光パルス応答の自己相関を利用しサブピコ秒の分解能で計測可能なシステムを構築した。その結果、ジョセフソン接合および超伝導マイクロブリッジについては、十分高速に応答し、高速スイッチング素子として利用可能であることが明らかとなった。また、レーザー走査型磁気光学顕微鏡を構築し、超伝導デバイス中の磁束量子の生成・消滅を観測した。

## 研究成果の概要（英文）：

Voltage pulses generated in the Josephson junctions (JJs) and superconductor bridges (SBs) by the irradiation of femtosecond laser pulses were measured with sub-picosecond time resolution using a voltage autocorrelation technique. As a result, we could observe fast and slow components of photo-induced voltages, which are shorter than several picoseconds and longer than several nanoseconds respectively, with JJs and SBs. A scanning laser magneto-optical microscope has been constructed and the modulation of single flux quantum could be observed.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2010年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
総計	20,500,000	6,150,000	26,650,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：超伝導、光応答、光インターフェイス、磁束量子

## 1. 研究開始当初の背景

情報通信におけるトラフィックは増加の一途をたどっており、光通信における信号処理速度の向上が非常に重要な課題となっている。しかしながら、CMOSを代表とするシリコンデバイスは、発熱及び遅延時間等の問題が深刻化しており、素子の微細化による動作速度向上も限界に達しつつある。これに対して、電子の代わりに磁束量子をキャリアとして用いる単一磁束量子(SFQ)論理回路では、

バイアス電圧は基本的にゼロまたは非常に小さく、ゲート当たりの消費電力は半導体素子に比べて3桁程度小さくすることが可能である。しかしながら外部半導体機器との出入力インターフェイス開発が非常に重要な課題として存在しており、未だ有効な手だては示されていない。

上記のような理由から研究代表者はこれまで、SFQ論理回路の光入力インターフェイスを念頭に置き、フォトミキシング信号や極短

パルス信号用など数種類の超伝導デバイス用光入力素子を作製し評価してきた。これらの研究が契機となり、それまでほとんど行われていなかった超伝導デバイス用の光インターフェイスに関する研究が、現在国内の数グループで行われている。しかしながらそのほとんどが受光素子として UTC-PD や半導体と用いた光スイッチを用いており、前述した消費電力の面での優位性はない。私は、半導体などの他の材料を用いない全超伝導型光デバイスの開発が重要であると考えており、とりわけ近年はジョセフソン磁束フロートランジスタ(JVFT)の極短パルス光応答を利用した光インターフェイスの研究を行ってきた。また、光入力に比べて技術的に遙かに困難であるため、これまでほとんど手のつけられていなかった、光出力インターフェイスの開発も切望されている。

## 2. 研究の目的

ポスト CMOS として期待されている単一磁束量子(SFQ)論理回路であるが、上記のような非常に高いポテンシャルを持っているにも関わらず、実用化に向け非常に重要な技術である、高速性を十分に生かした入出力インターフェイスが実現できていない。特に、SFQ 回路の高いスループットを生かすことの出来る、光通信分野で有効な光入出力インターフェイスの実現が重要である。このような状況において、我々は超伝導デバイス用の光入出力素子の開発を行ってきた。特に、光入力に関してはジョセフソン磁束フロートランジスタ構造を持つ、光入力インターフェイスを独自に提案し、研究開発を進めており、先進的な成果を上げている。光出力インターフェイスについても、磁気光学(MO)効果を用いた独自の方式を提案しており、これまで世界最高レベルの高感度な磁気光学顕微鏡の開発に成功するなど、その基盤技術を着々と整備している。しかしながら、磁束量子が発生する磁気信号を光信号として取り出す、光出力インターフェイスの開発は、光入力に比べて格段に困難である。そのため、未だに原理実証さえなされていない。

今回の提案では、超短パルス光および MO 効果を利用した先進的な入出力インターフェイスの基板技術開発を行い、その高速性・有用性を実証することが目的である。極短パルスレーザー光をジョセフソン接合に照射すると超伝導電子対の破壊により超伝導電流が減少する。このとき超伝導ループの中に磁束量子が生成される。このことはジョセフソン接合が光パルスによって開閉する磁束ゲートとして機能し、キャリアである磁束の動きを制御出来ることを意味する。また、光出力部では、超伝導素子の上にガーネット薄膜を積層し、MO 効果により照射したパルスレ

ザーの偏光面を回転させる。これにより、磁気信号を光信号として取り出すことが可能となる。

この研究により、超伝導磁束量子デバイスが超高速オプトエレクトロニクスとして、光通信分野における中核的なデバイスとなると考えている。

## 3. 研究の方法

ジョセフソン接合の光応答に関する微視的モデルを構築し、高速演算及びスイッチング可能な光入出力インターフェイスを開発するためには、(i) 光生成磁束のダイナミクスを観測するための光応答計測システムの構築、(ii) 光出力インターフェイスを念頭に置いたレーザーMO 検出システムの構築と性能評価、を並行して行う必要がある。

本研究では、低ノイズダブルパルス計測システムの構築、そのシステムを用いたジョセフソン接合の光応答速度の実測し、デバイス構造が光応答特性に与える影響を検証する。そして、新規なレーザーMO 検出システムを構築し、MO 効果による磁束の高速検出技術の開発を行う。

すべての実験の統括および検出システムのデザインを研究代表者が行った。デバイス作製、計測システムの構築および計測に関しては、代表者と大学院生が協力して行った。また、レーザーMO 検出システムの構築に関しては、すでに MO イメージングシステムの開発経験のある村上博成准教授と協力して行った。デバイス作製および光計測システム構築では、研究補助として大学院修士課程の学生3名と協力して行った。

## 4. 研究成果

本研究で得られた成果に関して、1) 高温超伝導体のナノブリッジの作製および特性評価、2) ジョセフソン接合の光応答計測、3) ナノブリッジの光応答計測、4) 高温超伝導体の超短パルス応答メカニズム、5) 走査型 MO 顕微鏡による動的磁束観察の5つの課題に分けて記述する。

### (1) 高温超伝導ナノブリッジの作製および特性評価

ナノブリッジの作製プロセス開発に関しては、超伝導薄膜のミリング加工後に約2~3nmのYBCO 極薄膜を堆積し、欠損元素を補った後にポストアニールを行う、名古屋大学藤巻研究室で開発されたプロセスを導入した。この手法により、線幅が30nmで超伝導電流密度が10Kにおいて $5.6 \times 10^8$  A/cm<sup>2</sup>と、薄膜の臨界電流に匹敵する高い電流密度を持つナノブリッジの作製が可能であることがすでに報告されていた。ただし、特性の再現性に

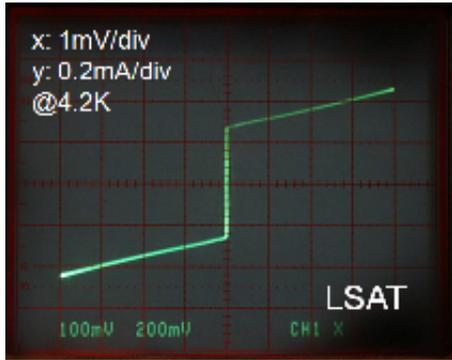


図1 LSAT 基板上に作製したナノブリッジの I-V 特性

問題があり、また断面形状が台形状に歪む等の問題点が残っていた。これに対して、基板をから MgO から格子不整合の小さい LSAT に変更することにより、ナノブリッジ作製における歩留まりおよび再現性が飛躍的に向上した。また、I-V 特性に関しても、従来のフラックスフロー型から  $I_c$  近傍で急峻に電圧状態に遷移する RSJ タイプの I-V 特性を示すナノブリッジの作製が可能となった。また、作製したナノブリッジで SQUID 構造を作製したところ、印可磁場に対して臨界電流の明瞭な振動が観測され、ジョセフソン弱結合的な特性を持っていることが確認された。

### (2) ジョセフソン接合の光応答

ジョセフソン接合およびナノブリッジの光応答を計測するため、ダブルパルス計測システムを構築した。これは、超伝導体への超短パルスレーザー照射により発生する電圧の非線形性を利用し、その自己相関を計測することによって、応答時間を計測するシステムである。従来は、発生したパルス電磁波の波形や電気光学 (EO) 結晶を用いた方法で測定していたが、これらの手法では接続している配線構造等の影響が大きいという難点があった。これに対して、自己相関を用いた手法では、光照射位置の局所的な発生電圧そのも

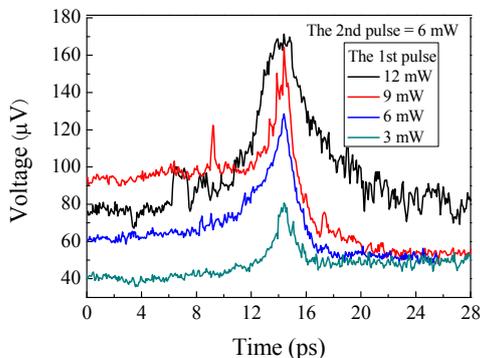


図2 パルスレーザー照射時によるジョセフソン接合の光応答

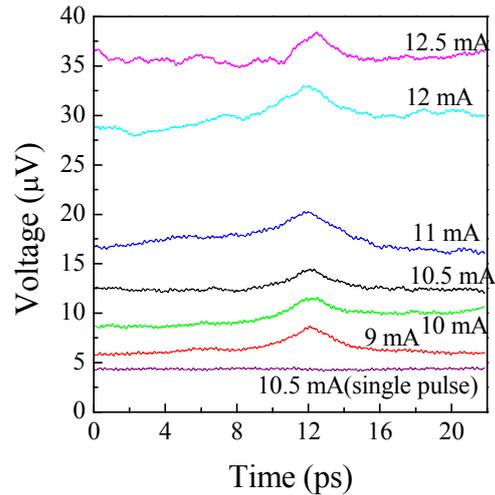


図3 マイクロブリッジの光応答

のをサブピコ秒の分解能で計測できる。そのため、材料本来の応答速度の検証に有効である。その結果、ジョセフソン接合では図2の様なパルス応答が計測され、光応答時間は照射するレーザーパワーに依存し  $0.5 \sim 4$  ps 程度であることが明らかになった。また、光照射下で Fiske ステップを観測し、そのステップ間隔からジョセフソン磁束のフロー速度が  $3 \times 10^6$  m/s と見積もることができた。

### (3) ナノブリッジの光応答

今期は、本計測システムにより MgO 基板上に作製した線幅 200nm 程度の YBCO ナノブリッジの光応答を計測した。その結果、上記ナノブリッジ光応答速度は、ジョセフソン接合においてみられたような高速なパルス応答は観測されなかった。ただし、レーザー照射による電圧発生は確認されており、ダブルパルス法による計測時間範囲である 1nm より大きな、遅い応答が支配的となっていると考えられる。ナノブリッジと比較するために線幅  $5 \mu\text{m}$  のマイクロブリッジで同様の実験を行った結果、図3のようにパルス応答が観測された。この結果により、パルスの半幅は  $2.5 \sim 6$  ps 程度でマイクロブリッジにおいてもかなり高速なスイッチングが期待できることが明らかとなった。また、図4に示すように計測された電圧のオフセットはブリッジに流すバイアス電流が増加すると、それに伴い増えるが、電圧ピーク高さはバイアス電流にほとんど依存せず  $4 \mu\text{V}$  程度であることが分かる。次節で述べるように、前者が熱の効果による遅い成分で、後者が光励起による速い応答であると考えられる。また、ダブルパルス法とテラヘルツ放射当時測定に成功しており、出力電圧と電流変化の関係を明らかにすることを試みている。

### (4) 高温超伝導の超短パルスレーザーに対する

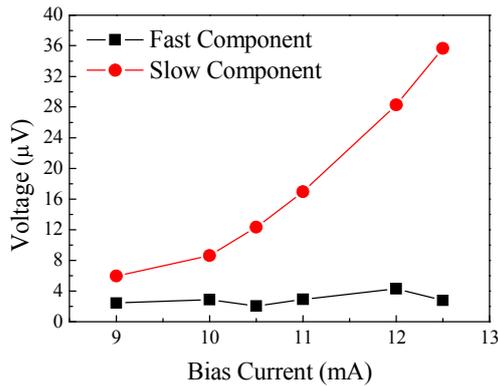


図4 高速応答および低速応答の出力電圧のバイアス電流依存性

#### る応答メカニズム

本研究では、励起レーザーに波長 800nm と 1.5μm の 2 種類のレーザーを用いたが、高速応答が観測されたのは 800nm のみであり、1.5μm では計測範囲 (約 1ns) 内での高速応答が見られなかった。このことは、電圧発生のメカニズムとして、光励起による対破壊を考えた場合、両波長とも超伝導ギャップ (十数 meV) に比べて十分大きなフォトンエネルギーを持っていることから単純には理解できない。波長 800nm は Cu の dd 遷移に対応しており、このことが原因でとなっている可能性がある。

また、現在のところ、ジョセフソン接合およびマイクロブリッジでは数ピコ秒以下の高速応答が確認されたが、ナノブリッジでは高速な応答は見られない。この原因としては、次のように考えることができる。レーザー照射によりホットスポットと呼ばれる常伝導コアが形成されるが、電流密度の小さいジョセフソン接合や、幅のある程度広いマイクロブリッジでは、全体に広がることなく消滅する。しかしながら、ナノブリッジにおいては、ホットスポットの形成によりさらに線幅が狭くなり容易に臨界電流を超えるため、ホットスポットが拡大しブリッジ全体が常伝導となる。このようにして形成された常伝導部分の大きな発熱を伴うため、数百ナノ秒以上の非常に遅い応答になると考えられる。図4に見られるようにマイクロブリッジにおいて、高速応答部分と低速応答部分のバイアス電流依存性が明らかに異なる。低速応答電圧がバイアス電流増加とともに増加するのに対して、高速応答部分はほぼ出力が一定となっている。これは、それぞれの発生電圧メカニズムが異なることを示しており、前者は熱的な効果で、後者が光励起によるものであると考えている。

#### (5) 走査型 MO 顕微鏡による動的磁束観察

我々は、磁気光学ファラデー効果を使って、

超伝導体中の磁束分布および超伝導デバイス中の局所的な磁気シグナルの高速検出を目的として、レーザービーム走査型の磁気光学顕微鏡の開発を行ってきた。磁気光学顕微鏡は、従来から超伝導体中の磁束観察などに使用されているが、今回開発したシステムの主な特徴として、以下のような特徴を持っている。

①従来の磁気光学顕微鏡が何れも水銀ランプやハロゲンランプなどの光源を用いた通常の明視野顕微鏡法をベースとして、また冷却 CCD などを用いて磁束の二次元分布像を観察するのに対し、開発したシステムではレーザーを光源としてガルバノメータによりレーザービームを二次元走査することにより 1 画素ごとの信号を検出している。

②レーザー光検出部を 2 つの検光子とフォトダイオードを有した差動型検出器の構成にしているため、データの積算や平均化などの処理を一切することなく  $5 \cdot T$  (テスラ) 程度の磁気感度を達成している。また、この構成のため磁束の向きや大きさを直接反映した信号を得ることが可能である。

③レーザービームを試料表面上で走査させながら磁気光学信号を検出するため、試料内の特定の位置にレーザービームを固定することで、デバイス内の局所的な磁気シグナルを連続的に検出することが可能である。

④画素ごとのデータサンプリングを行うため、磁場変調、光変調法などを併用してロックイン検出することで、より高感度なイメージングおよび信号検出が可能。

このレーザー走査型 MO 顕微鏡を用いて、単

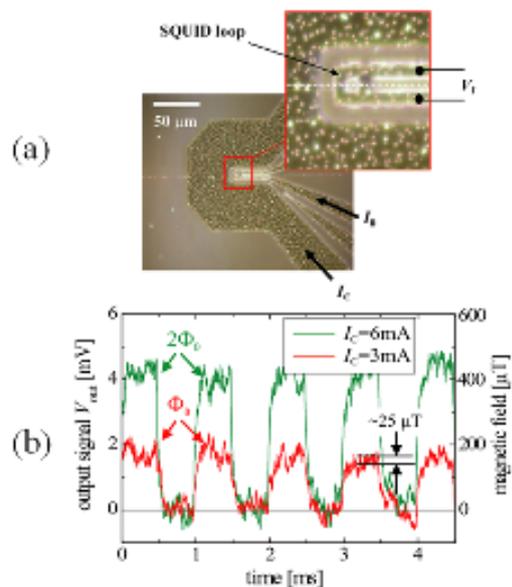


図5 (a)YBCO-ジョセフソン・ボルテックスフロー型トランジスタ。(b)コントロール電流をパルス的に流した時の SQUID ループ内の磁気光学シグナル。

一の SQUID を有するジョセフソン・ボルトテックフロー型トランジスタを 観測した結果を図 5 に示す。測定では  $3 \times 3 \mu\text{m}^2$  のループ面積を持つ SQUID の周辺に設けたコントロール電流ラインにパルス電流  $I_c$  を印加し、SQUID ループ内に発生する磁束の観察を、このループ内にレーザービームを固定した状態で連続的に行った。この際、このデバイスのコントロール電流-SQUID フロー電圧特性から予め、コントロール電流 3mA に対し 1 つの磁束量子が SQUID ループ内に発生することが観測されており、図 5b に示す  $I_c=3\text{mA}$ 、6mA のパルス高をもつ電流を印加した際のシグナル変化はそれぞれループ内に 1 個、2 個の磁束量子が発生したことを示している。

この局所的なシグナル検出において、その検出速度は高速デバイスなどへの応用を考える際重要であるが、現在使用している差動増幅器の帯域が 30MHz であり、この帯域によって制限されている。しかしながら、フェラデー素子自体の応答性はピコ秒程度とかなり高速であり、今後光検出系の高速化を行うことにより少なくとも 1GHz 程度の高速信号の取り扱いが可能になると考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

①Ryosuke Kaneko, Iwao Kawayama, Hironaru Murakami, and Masayoshi Tonouchi, "Detection of Pulsed Terahertz Waves Using High-Temperature Superconductor Josephson Junction", Applied Physics Express, Vol.3, pp. 042701, 2010

②H. Murakami, R. Kitamura, I. Kawayama and M. Tonouchi, "Magneto-optical detection of single flux quantum signals in superconducting quantum interference device", Applied Physics Letters, Vol. 95, pp. 192503-1-3, 2009

③Iwao Kawayama, Yasushi Doda, Hironaru Murakami, Masayoshi Tonouchi, "Superconductor Photonics for Terahertz Electronics", IEEE Xplore, Conference Series, 2009 IEEE Tronto Intrenational Conference, pp. 866 - 869, 2009

④H. Murakami, R. Kitamura, I. Kawayama and M. Tonouchi, "Development of a high-speed and a high-sensitive laser scanning magneto-optical imaging system" J. Phys. Vol. 150, 012029, 2009

⑤R. Kitamura, H. Murakami, I. Kawayama and M. Tonouchi, "Detection of Magnetic Signal in High-Tc Superconductor Devices by Scanning Laser Magneto-Optical Microscope", IEEE Trans. Supercond., Vol. 19, Issue 3, pp. 745-748, 2009

[学会発表] (計 8 件)

① 川山巖、ナノ構造制御した光生成磁束量子デバイスの創整、2012 年春季第 59 回応用物理学会学術講演会シンポジウム「ストスケーリング時代における次世代革新的デバイスおよび材料の探索」、2012 年 3 月 15 日、早稲田大学

② 菊田真也、金子亮介、川山巖、梶野顕明、藤田圭佑、安保宇、井上真澄、藤巻朗、村上博成、斗内政吉、高温超伝導体ジョセフソン接合およびナノブリッジの光応答メカニズムの検討、第 72 回秋季応用物理学会学術講演会、2011 年 8 月 31 日、山形大

③ 菊田真也、金子亮介、川山巖、梶野顕明、藤田圭佑、安保宇、井上真澄、藤巻朗、村上博成、斗内政吉、YBCO ナノブリッジを用いた高速光スイッチングデバイスの開発、電子情報通信学会 2010 ソサイエティ大会、2010 年 9 月 14 日、大阪府立大学

④ Iwao Kawayama, Kemmei Kajino, Masumi Inoue, Akira Fujimaki, Hironaru Murakami, Masayoshi Tonouchi, Optical responses of superconducting nanobridges under the irradiation of femtosecond laser pulses, Applied Superconductivity Conference, August 1-6, 2010, Washington, D.C.

⑤ Iwao Kawayama, Kemmei Kajino, Masumi Inoue, Akira Fujimaki, Hironaru Murakami, Masayoshi Tonouchi, "Study on optical interfaces for superconducting electronics", 2010 Savoie Workshop, May 27-28, 2010, Chambéry, France

⑥ Iwao Kawayama, Masayoshi Tonouchi, Hironaru Murakami, "Superconductor Photonics for Terahertz Electronics, 2009 IEEE Toronto International Conference - Science and Technology for Humanity (IEEE-TIC-STH 2009), September 26-27, 2009, Tronto, Canada

⑦ I. Kawayama, Y. Doda, M. Murakami, K. Kajino, M. Inoue, A. Fujimaki, M. Tonouchi, "Optical Responses of YBCO Josephson Junctions and Nanobridges", Euroflux2009 International Conference, O-S2, September 20-23, 2009, Avignon, France

⑧ Iwao Kawayama, Yasushi Doda, Hironaru Murakami, Kenmei Kajino, Taishi Kimura, Masumi Inoue, Akira Fujimaki, Masayoshi Tonouchi, “Ultrafast optical switch using optically generated Josephson vortices terahertz-wave generation”, International Superconductive Electronics Conference (ISEC09), June 16-19, 2009, Fukuoka, Japan

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川山 巖 (KAWAYAMA IWAO)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教

研究者番号：10332264