

# 研究報告書

## 「ナノ構造制御した光生成磁束量子デバイスの創製」

研究期間：平成20年10月～平成24年3月

研究者：川山 巖

### 1. 研究のねらい

CMOS-LSI を代表とするシリコンデバイスは、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。この問題を打開する候補の一つが、超伝導体を用いた単一磁束量子(SFQ)論理回路であり、発熱および遅延時間といった CMOS-LSI の問題を回避することが出来る。

この集積回路は 100GHz 以上で動作することが予想されるが、その際問題となるのが、室温回路との入出力である。SFQ で期待されている 100GHz を超える周波数領域において、従来の電気信号と金属配線の組み合わせでは、インピーダンス整合などの問題がある。そのような問題を回避するためには光信号の直接入力がある。

また、SFQ 回路の論理ゲートにはジョセフソン接合と超伝導線路により構成される超伝導ループが不可欠であり、ループ中に保持される磁束がほぼ磁束量子 1 個分となるように構造が決定される。しかしながら、接合の臨界電流密度が小さいため、ジョセフソン接合を用いた論理ゲートの構成には、0.3 ミクロン角程度が最低必要であり、集積度の向上は原理的に困難であった。

そこで申請者は、これらの問題点を一気に解決するデバイスとして、光による信号の入出力と超伝導ナノブリッジを融合した光生成磁束量子デバイスと言う、新規な超低消費電力かつ高速動作可能な次世代電子デバイスを提案している。これは、超短パルスレーザーにより超伝導体に磁束量子を生成し、ナノブリッジを基本素子とする SFQ 回路により信号処理を行うものである。また、ナノブリッジは臨界電流密度の上限が接合に比べ 2 桁大きいため、超伝導ループの占有面積を、ジョセフソン接合を用いた場合に比べ格段に小さくできる。

本研究の目的は、上記の光生成磁束量子デバイスの基盤技術を構築することである。具体的には、高品質なナノブリッジを再現性良く形成するプロセス技術を確立し、さら作製したナノブリッジおよびジョセフソン接合の光応答をテラヘルツ計測技術を駆使して計測することにより、光生成磁束の高速ダイナミクスを解明を目指す。

### 2. 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、の4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Ic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。

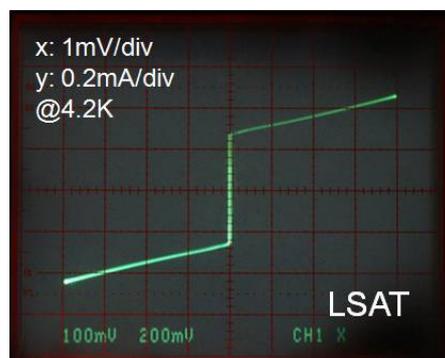


図1 LSAT 基板上に作製したナノブリッジのI-V 特性

## 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 0.5~4ps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。

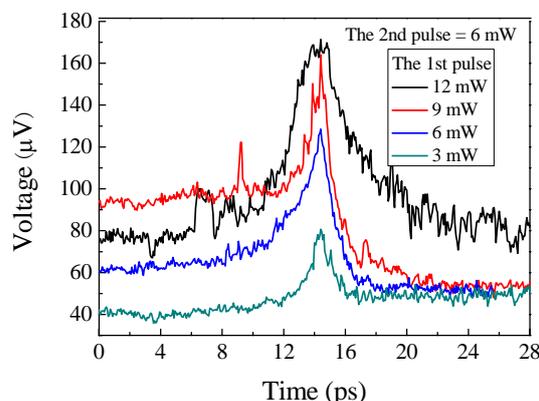


図2 パルスレーザー照射時によるジョセフソン接合の光応答

## 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 5μm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

値幅は 2.5~6ps 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 $\mu$ 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。

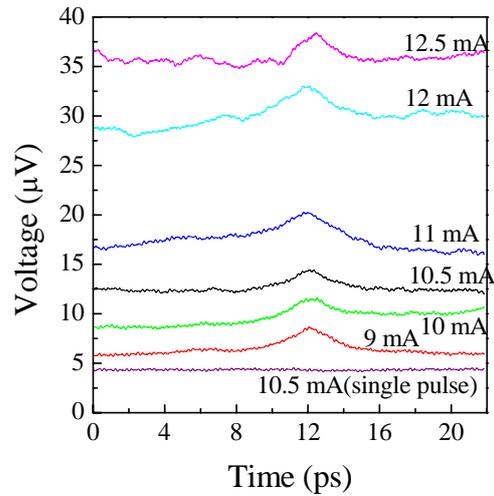


図 3 マイクロブリッジの光応答

### 3) 高温超伝導の超短パルスレーザーに対する応答メカニズム

本研究では、励起レーザーに波長 800nm と 1.5 $\mu$ m 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、1.5 $\mu$ m 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。

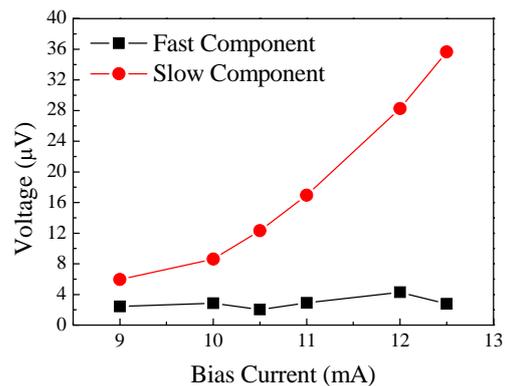


図 4 高速応答および低速応答の出力電圧のバイアス電流依存性

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。

### 3. 今後の展開

本研究で、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。今後、デバイスとして展開するためには、これらと SFQ 回路を組み合わせて、実際に演算が可能であることをデモンストレーションすることが必要である。また、今回波長 1.5 $\mu\text{m}$  の光では高速な応答が観測されなかったが、この光応答の波長依存性についても、より詳細なデータが必要である。そして、今後最も重要なことは、本来の目的であるナノブリッジの高速応答を確認することである。原理的にはナノブリッジはピコ秒もしくはそれ以下の応答時間で動作可能であると考えられるので、素子構造を最適化することにより、ホットスポットの成長を抑え、光励起による高速応答の観測を目指す。また、光応答機構の解明に関しても、これまでのバイアス依存性やパワー依存性の結果から、ボルテックスフローモデルと電流変調モデルに絞り込まれている段階である。今後、定量的な解析により、ジョセフソン接合、ナノブリッジ、マイクロブリッジのそれぞれの応答のモデル化を進める。

### 4. 自己評価

当初の研究計画では、ナノブリッジの作製プロセスの改良、レーザーパルスによるダブル照射より発生する電圧の自己相関を利用した新規な計測法による応答時間計測、テラヘルツ放射の観測、超短パルスレーザー照射に対する応答モデルの確立、そして光生成磁束量子デバイスのデモンストレーションを研究課題としてあげていた。このうち、ナノブリッジの作製プロセスに関しては、格子整合基板上の超薄膜の利用および酸素分圧の制御により、未だ実用デバイスの領域ではないが、実験当初よりも格段に再現性、特性ともに向上させることができた。光応答に関しては、ジョセフソン接合およびマイクロブリッジに対して、ダブルパルス法による高速応答を観測し、テラヘルツ放射の同時観測にも成功している。光応答の機構に関しても、定性的な理解は進んだと考えている。そういう意味では、デバイスとしてのデモンストレーションについては時間的に困難であることを当初から予想していたので、計画の 7~8 割は達成しているが、最も重要であるナノブリッジの高速応答を達成できていない点は、大きな反省点である。試料の作製プロセス、冷却システム、および計測時のノイズ対策など逐次的な改良で対処しようとした結果、予定より時間がかかってしまった。問題点の洗い出しを一気行い、プロセス、システムの最適化を総合的に行うべきであった。また、これまでの成果に関する論文の執筆が遅れており、これも大いに反省すべき点である。今後順次投稿していく予定である。

### 5. 研究総括の見解

CMOS に代表されるシリコンデバイスは素子の微細化による発熱および動作速度向上の限界を迎えており、その解決法として超伝導を用いた単一磁束量子(SFQ)論理回路が提案されています。しかし SFQ デバイスを実用化使用とすると、室温回路との間にどのように入出力を採るかが問題になります。光信号でインターフェースできれば、この問題は解決します。また、従来の SFQ 素子には双晶境界を用いて作製したジョセフソン接合が用いられますが、高集積のための微細化を行うと十分な超伝導電流がとれないという問題がありました。川山研究者は、光による信号の入出力と超伝導ナノブリッジを融合した「光生成磁束量子デバイス」という新規な超低消費電力かつ高速動作可能な次世代電子デバイスを提案しました。

川山研究者は、YBCO のナノブリッジを再結晶法で製作しましたが、基板結晶として MgO に代

えて格子整合性に優れた LSAT を用いることで結晶性を改善し、 $I_c$  近傍で急峻に電圧状態に移る RSJ タイプの I-V 特性をもつすぐれた特性のブリッジ素子を作製することに成功しました。光入力に対する応答性を評価するため、新たにレーザーパルスのダブル照射より発生する電圧の自己相関を利用した応答時間計測のシステムを完成させ、これを用いて、ジョセフソン接合、マイクロブリッジ(幅  $5\mu\text{m}$ )、ナノブリッジ(幅  $200\text{nm}$ )の光応答を調べました。その結果、ジョセフソン接合およびマイクロブリッジにおいては、ps の高速光応答を観測することができましたが、ナノブリッジでは観測できませんでした。ナノブリッジで観測できなかったのは、熱の問題があると考えられます。また、光出力に関しては、YIG 膜の磁気光学効果を用いた検出系を作製し応答を確認しました。

微細超伝導電子デバイスに真っ正面から取り組み、特性の優れたナノブリッジの製作に成功した点は、大いに評価できます。ただ、高速光応答性をナノブリッジで実現できなかったのは残念です。今後、この研究で明らかになった問題を解決して、所期の結果をめざして研究を進められるよう期待します。

## 6. 主な研究成果リスト

### (1)論文(原著論文)発表

- |  |
|--|
| 1. R. 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 |
| 2. H. 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   |
| 3. Iwao Kawayama, Yasushi Doda, Hironaru Murakami, Masayoshi Tonouchi, "Superconductor Photonics for Terahertz Electronics", IEEE Xplore, Conference Series, 2009 IEEE Tronto Intrenational Corference, pp. 866 – 869, 2009          |
| 4. H. 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          |
| 5. Ryosuke 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        |

### (2)特許出願

なし

### (3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物等)

(招待講演) 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

(依頼講演) 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

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

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