

平成 21 年 4 月 16 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560362

研究課題名 (和文) 単一磁束量子回路の光出力インターフェースの開発

研究課題名 (英文) Development of optical output interface for single flux quantum circuits

研究代表者

楠 正暢 (KUSUNOKI MASANOBU)

近畿大学・生物理工学部・准教授

研究者番号：20282238

研究成果の概要：

サブテラヘルツ領域で動作する集積回路として注目されている、単一磁束量子 (SFQ) 回路の光出力インターフェースの基本素子として、高温超伝導ナノブリッジの作製プロセスの開発を行った。数 100nm 程度のスケールを有する高温超伝導ナノブリッジを用いた微小ループを基本構造とし、そこに閉じ込めた SFQ を磁気光学効果により検出するデバイスを想定し、その作製法を検討した。さらにナノブリッジを光入力デバイスとして動作させることも試み、その光応答を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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、ナノブリッジ、単一磁束量子、インターフェース

## 1. 研究開始当初の背景

情報通信機器の発展に伴い、サブテラヘルツ領域で動作する集積回路への要求が高まっている。これを実現できるものとして、高速性と低消費電力性を合わせ持ち、半導体集積回路における発熱と配線遅延の問題を同時に解決し得る、単一磁束量子 (SFQ: single flux quantum) 回路が有力候補として注目さ

れている。2006 年までに、藤巻ら<sup>1)</sup>による 20 GHz プロセッサ、120 GHz シフトレジスタなど、SFQ 回路の世界最速技術の実証が報じられ、期待が一層高まっている。一方、ジョセフソン接合を基本素子として低温動作する SFQ 回路の実用化には、それと室温動作するデバイスとをつなぐ入/出力インターフェースが不可欠であるが、特に出力インターフェースについては具現化されておらず、技術的な見通しが立っていない。

1) "Demonstration of 120GHz Single Flux Quantum Circuits Based on 10kA/cm<sup>2</sup> Nb Process": Extended Abstract ISEC, P-B08 (2005).

情報通信機器としての利用をターゲットとした SFQ 回路に対し、「光ファイバネットワークとの接続が不可避であること」、また「低温環境からの微弱な信号を熱雑音の影響を受けずに室温に取り出すためには光出力が最適であること」の2点を考慮し、「SFQ-光変換」機能を有する出力インターフェースを実現する構想を、本研究を組織するメンバーである、藤巻、斗内らと共に計画してきた。具体的には、100nm 程度のスケールを持つ高温超伝導 (HTS) ナノブリッジを用いた微小ループを基本構造とし、そこに閉じ込めた SFQ を磁気光学 (MO) 効果により検出するという動作原理に基づくデバイスの開発を目指す。図 1 にその原理を示す。ナノスケール構造を持つデバイスとする理由には、「量子化された僅か  $2 \times 10^{-15}$  Wb の SFQ を、MO 効果により検出する際の感度を十分なものとするために、磁束密度を高めねばならないこと」、また、「SFQ が 1 個ずつ出入りするゲートとしての役割を果たさねばならないため、SFQ の大きさと同程度の寸法が要求されること」が挙げられる。

本研究に関する先行技術として、斗内らにより、「MO 効果を用いた、HTS 単結晶中の SFQ の観測」が報告されている。<sup>2)</sup>これは、HTS 上の磁気光学結晶フィルムに入射する光の偏光・反射の状態が、HTS 中の SFQ の有無により変化することを利用したものであり、独自に開発された磁気光学顕微鏡により観察に成功した成果である。今回この現象を応用することにより、SFQ 信号を光信号に変換するデバイスを想定し、そのデバイス構造を実現することを計画した。

## 2. 研究の目的

本研究の全体構想としてはその出力インターフェースユニットを実現することにあるが、今回の課題においては、その基本素子の作製プロセスの検討と試作を主な目的として行った。SFQ-光変換デバイスは SFQ 集積回路と同一チップ上に組み込むことが要求されるため、それを想定した作製プロセスを予め検討しておかなければならない。図 1(a) に示すナノブリッジは既に開発済みの収束イオンビーム (FIB) リソグラフィーを基本としたプロセス<sup>3)</sup>で作製を行ったものである。そのナノブリッジによる微小ループの電流-磁場特性が周期的に変化することをも

2) “Magneto-optical imaging of magnetic flux distribution in high-T<sub>c</sub> superconductors”, PHYSICA C, vol.412, p1343 (2004).

3) “Submicron Patterning Technique for YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> Films Using Focused Ion Beam Lithography”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33, p1124 (1994).

4) “Vortex flow Transistors with nano-structures”, Advances in Superconductivity, vol.8, p1193 (1996).

でに実験的に確認<sup>4)</sup>しており、それがあたかも超伝導磁束量子干渉素子 (SQUID) のように振舞い、(図 2(b)) ジョセフソン接合を使わなくとも単一磁束量子のゲートとして働きうることをも示してきた。これは、デモンストレーションとしては十分な技術であったが、複雑なプロセスを組み合わせる行うために、高い歩留まりが要求される集積回路作製プロセスとしては適さない。そこで、一般的なレジストを用いたリソグラフィーによる代替プロセスを検討することが、本研究の

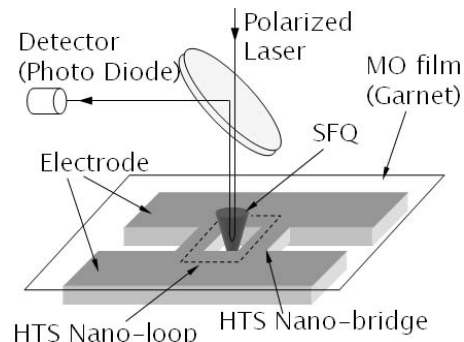


図 1. SFQ/光変換インターフェースの原理

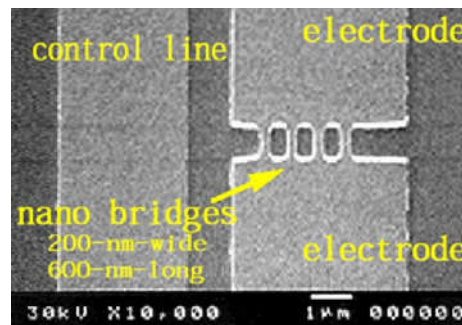


図 2(a). FIB を用いて行った HTS のナノ加工例 (ボルテックスフロートランジスタ)

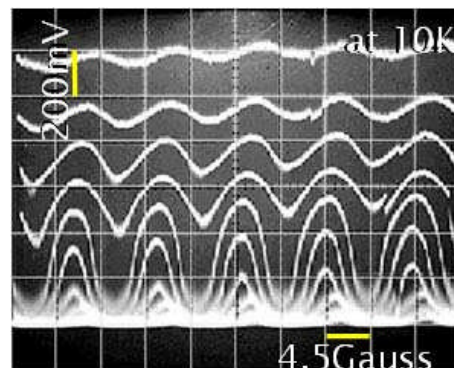


図 2(b). ナノブリッジを用いた HTS ループの磁場応答特性 (2 ブリッジの素子。異なるバイアス電流を与えた場合の特性を多重露光で撮影)

主たる目的である。ここで既に明らかとなっている注意すべき事項として、プロセス中の HTS の劣化に起因する、ナノブリッジの電気特性の低下が挙げられるため、劣化の影響を小さくする手法を併せて検討する。

### 3. 研究の方法

- ① 電子ビームリソグラフィーでレジストパターンを作製する条件を導出する。
- ② HTS 薄膜の結晶 c 軸方向からの酸素原子の拡散を防ぐための保護層の検討を行う。(実験に用いた HTS は基板面に対し c 軸が垂直に配向した  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ : YBCO 膜)

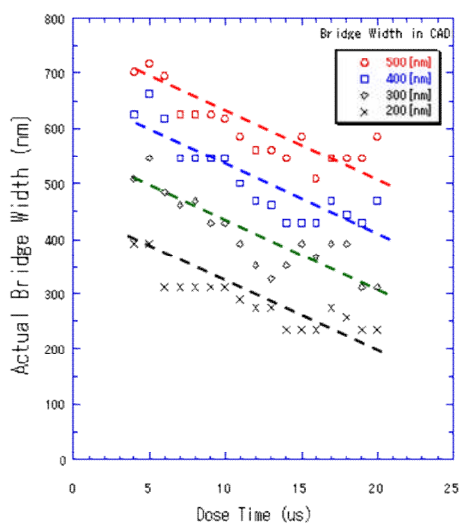


図 3(a). 電子ビームの照射時間と現像されたレジストのブリッジパターン幅  $w$  の関係 (加速電圧、ビーム電流、ビームスキャンレートは一定)

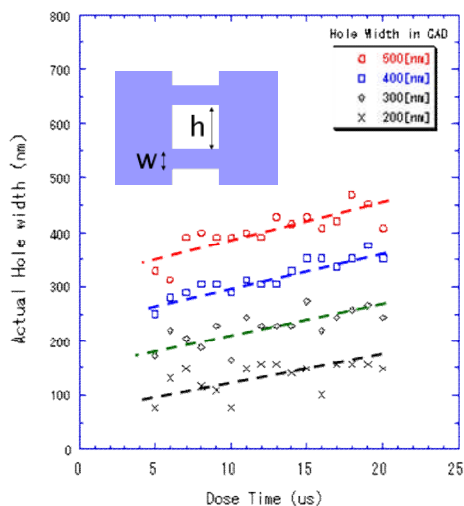


図 3(b). 電子ビームの照射時間と現像されたレジストのホールパターン幅  $h$  の関係 (加速電圧、ビーム電流、ビームスキャンレートは一定)

- ③ HTS 薄膜の結晶 a, b 軸方向からの酸素原子の欠損を防ぐために、エッチング時のプラズマに起因する試料の温度上昇を抑制するための試料ステージの改良と、効率的な冷却システムへの改造を行う。
- ④ エッチングを施した試料の超伝導特性の評価を行う。
- ⑤ ナノブリッジを用いた微小ループに閉じ込めた SFQ を磁気光学 (MO) 効果により検出することを想定した場合の磁束密度の見積もりを行う。
- ⑥ ナノブリッジのスイッチング速度の見積もりを行う。
- ⑦ 光入力デバイスとしての動作確認を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 結果と考察

電子ビーム露光条件の導出は、図 3 のように行った。(b) の挿絵のように 2 本のブリッジを作製した際のブリッジ幅  $w$  とそれによってできる穴の寸法  $h$  について、電子ビーム照射時間との関係を、現像後のレジストパターンの実測により求めた。加速電圧、ビーム電流、ビームスキャンレートは一定のある条件下で行った。以降の実験では、このグラフから必要な構造を得るための、描画条件を用いて行った。

c 軸方向からの酸素原子の拡散を防ぐための保護層として、過去の研究で有用性が確認できている  $^{31}\text{Au}$  の適用を試みた。ところが、電子ビーム露光時に、Au 層での電子ビームの反射、散乱が原因で生じるとされるバックスキヤッタ現象が起こり、図 4 のように、パターンぼけが生じ、いかなる照射条件でも改善することができなかった。そこで、Au 上にさらに 30nm 程度 Pt キャップ層を導入したところ、バックスキヤッタを避けることが可能となった。この、Pt を用いた場合の試料では、エッチング後の HTS の最小線幅は 80nm であった。

HTS 薄膜の結晶 a, b 軸方向からの酸素原子の欠損を防ぐ目的で、エッチング時のプラ

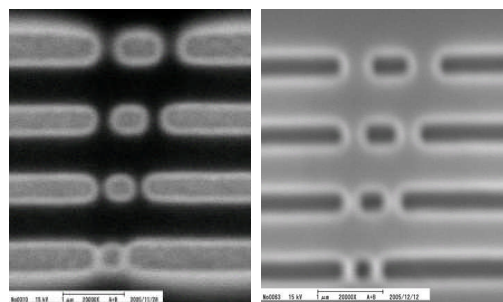


図 4. Au 上への EB 描画時に生じるバックスキヤッタによるパターンぼけ(左)と、Pt キャップ層を導入したことによる改善(右)

ズマ照射により発生する試料の温度上昇を抑制するための試料ステージの改良を行った。図5はその概要を示している。従来の研究では、液体窒素冷却や間欠エッチングによる冷却での効果<sup>3)</sup>が示されているが、液体窒素の場合、試料の回転機構の真空シール部が凍結することによりリークを生じること、間欠エッチングでは、エッチングの時間的効率やプラズマを一定の状態に維持することが困難であるという理由から、本研究では試料ステージに、 $-20^{\circ}\text{C}$ 以下のエチレングリコール溶液を循環させることを試みた。また、ステンレス製のステージと試料の界面での熱伝導を高める目的で、導電性ゴムのシートを用いた。

以上のように準備したレジストをマスクとして、ECR プラズマエッチングを行った。マイクロ波電力、引き出し電圧、加速電圧、イオン密度をある条件下で行った際の、素子の形状を図6(a)に示す。幅200nm長さ100nmのブリッジ2本を100nmの距離を置いて並べた構造である。この素子を液体窒素で冷却した際の、電流(I)-電圧(V)特性が(b)である。これから見積もられる臨界電流密度  $J_c$  は  $0.7\text{MA}/\text{cm}^2$  であり、加工前の膜の  $J_c$  である、 $2.8\text{MA}/\text{cm}^2$  の1/4にまで低下し、ブリッジ中に劣化領域が存在することを示唆する結果となったが、200nmでも液体窒素温度で超伝導特性を示すことが確認された。

本素子を、SFQ-光変換用インターフェースの基本素子として、この  $100\text{nm}\times 100\text{nm}$  の微小ループに閉じ込めたSFQを磁気光学(MO)効果により検出することを想定し、磁束密度を計算により見積もったところ、0.2Tという極めて高い値を実現することができ、MO効果での検出に十分であることが示された。また、ブリッジ長100nmは図2(a)の場合の1/6であり、SFQが確実に1つずつ出入りする寸法であり、インダクタンスも同時に小さくすることができる構造を実現できた。

図6の素子のI-V特性は電圧状態で磁束フローを示しており、ブリッジを横切る磁束はAbrikosov ボルテックスといえる。いま、その速度を  $2\times 10^4\sim 1\times 10^5\text{m}/\text{s}$  と仮定すれば、200nmの線幅のブリッジのスイッチング速度は2~10psと見積もられ、速度に対しても寸法がもたらす効果は極めて大きいものであるといえる。

さらに、本素子を光入力インターフェースとして用いることも検討した。この試験の背景には、ジョセフソン接合を用いたボルテクスフロートランジスタ、すなわちJVFTによる光入力成功の川山らの報告<sup>5)</sup>があり、そこ

では100GHzを超える高速動作が示されている。しかしながら、ジョセフソン接合に粒界

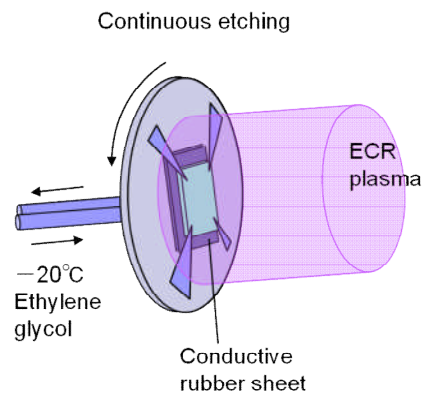


図5. ECR プラズマエッチング装置の試料ステージに施した冷却機構

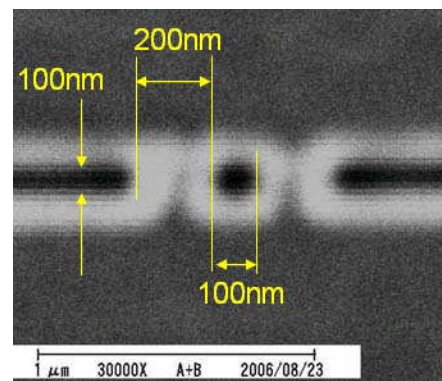


図6(a). 試作したナノブリッジの電子顕微鏡写真

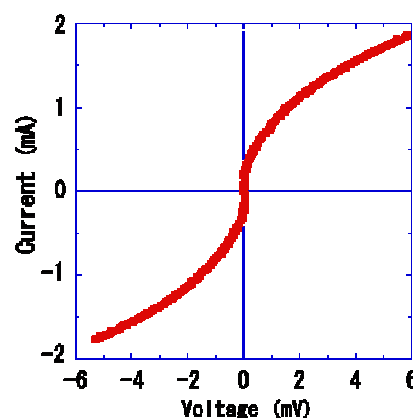


図6(b). 試作したナノブリッジを液体窒素冷却(77K)した場合の電流-電圧特性

5) “高温超伝導ジョセフソン接合によるテラヘルツパルス電磁波の検出”, 2008年秋季 第69回応用物理学学会学術講演, 3a-ZM-3 (2008).



接合を用いているため、作製面において位置的な制限があり、集積化には困難を伴う。そこで我々はジョセフソン接合の代わりにナノブリッジを用いる可能性について検討した。もし、再現性の良いナノ加工技術さえ確立できれば、ナノブリッジは JVFT の代替素子として動作可能であり、その寸法による高速動作が期待できるからである。今回、我々は SFQ 回路への光入力インターフェースとして HTS ナノブリッジを作製し、その光応答の確認を試みた。

400nm のブリッジにパルス幅 100 フェムト秒、中心波長 780nm、繰り返し周波数 82MHz、レーザースポット径  $100\mu\text{m}$  のチタンサファイアレーザーを照射し、その応答の測定を行った。

図 7(a) はレーザー照射時の I-V 特性の光応答を示したものであり、レーザーパワーの増加に伴い、臨界電流  $I_c$  に変調が見られ、光応答していることが確認できる。図 7(b) はレーザーパワーと臨界電流  $I_c$  の関係として、図 7(a) を置き直したものである。この結果は、レーザー照射により、超伝導電子対が破壊され、超伝導電子対密度が減少したことを示しており、ナノブリッジが光入力デバイスとしても動作し得ることを示している。

## (2) まとめ

SFQ 回路と光信号の入出力インターフェー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プロセスの検討を行った。電子ビームリソグラフィにおける最適ドーズ条件の導出を行い、また ECR プラズマエッチング時の温度上昇による超伝導特性の劣化を防ぐための冷却法を考察した。試料とステージの間に導電性シートを挿入することにより、熱伝導を確保し、 $-20^\circ\text{C}$  以下に試料ステージを冷却することで液体窒素温度において超伝導特性を示すナノブリッジの作成が可能であることを示した。

磁気光学効果を利用した光出力用素子を想定して、微小ループを有するダブルブリッジの作製を行った。高磁束密度、かつ低インダクタンスで SFQ を閉じ込めるための超伝導ループとして、ブリッジ幅 200nm、ホールサイズ  $100\text{nm}\times 100\text{nm}$  を作製し、77K で超伝導電流を観測した。一磁束量子がループに保持されることを仮定した場合の磁束密度は 0.2T と見積もられ、M0 検出に十分な値であることが明らかとなった。

光入力素子を想定し、幅 400nm のブリッジで光応答特性を評価した。フェムト秒レーザー光の入力に対し  $I_c$  が変調され、光照射による超伝導電子対密度の減少を示唆する結果が得られ、ナノブリッジが光入力デバイスとしても動作し得ることを示した。

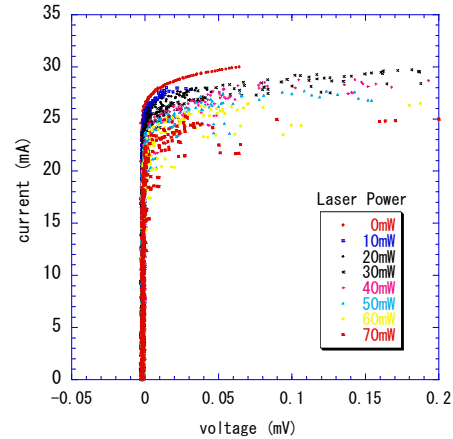


図 7(a). ナノブリッジ (幅 400nm) の電流-電圧特性に対する光応答 (測定温度 13K)

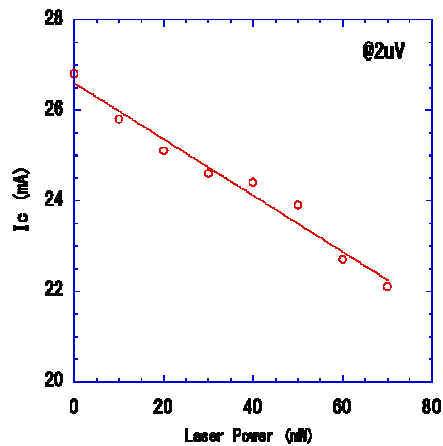


図 7(b). レーザーパワーを変化させた場合のナノブリッジ (幅 400nm) の臨界電流の変化 (測定温度 13K)

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ① 馬場康仁, 太田真輔, 楠正暢, 西川博昭, 本津茂樹, 堂田泰史, 川山巖, 村上博成, 斗内政吉, 藤巻朗: “高温超伝導ナノブリッジの作製と光応答特性”, 平成 20 年電気関係学会関西支部連合大会, 2008 年 11 月 8 日, 京都工芸繊維大学
- ② 太田真輔, 楠正暢, 西川博昭, 本津茂樹, 堂田泰史, 川山巖, 村上博成, 斗内政吉, 藤巻朗: “YBCO ナノブリッジの光応答特性”, 第 6 回低温工学・超伝導若手合同講演会, 2007 年 12 月 11 日, 大阪市立大学文化交流センター
- ③ 太田真輔, 楠正暢, 西川博昭, 本津茂樹, 堂田泰史, 川山巖, 村上博成, 斗内政吉, 藤巻朗: “高温超伝導ナノブリッジの作製と光応答特性”, 平成 19 年電気関係

学会関西支部連合大会, 2007年11月26,  
神戸大学

- ④ S. Ota, M. Kusunoki, H. Nishikawa, S. Hontsu, Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi, A. Fujimaki :  
“Optical response of high temperature superconducting nanobridge”, 20th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY, 2007年11月7日, つくば国際会議場
- ⑤ 井上真澄, 杉本学, 梶野顕明, 藤巻朗, 楠正暢 : “SFQ/光インターフェイス用 YBCO ナノブリッジの特性”, 第68回応用物理学会学術講演会, 2007年9月4日, 北海道工業大学

[その他] 奨励賞受賞

太田真輔, 楠正暢, 西川博昭, 本津茂樹, 堂田泰史, 川山巖, 村上博成, 斗内政吉, 藤巻朗 : “高温超伝導ナノブリッジの作製と光応答特性”, 平成19年電気関係学会関西支部連合大会, 2007年11月26, 神戸大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

楠 正暢 (KUSUNOKI MASANOBU)  
近畿大学・生物理工学部・准教授  
研究者番号：20282238

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

藤巻 朗 (FUJIMAKI AKIRA)  
名古屋大学大学院・工学研究科・教授  
研究者番号：20183931

斗内 政吉 (TONOUCHI MASAYOSHI)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号：40207593