

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23656238

研究課題名（和文）

低損傷ナノメートル加工による高温超伝導体ダイオードの創製とその応用

研究課題名（英文） High-Temperature Superconductor Diode Devices Prepared with Nano-Fabrication Technique

研究代表者

藤巻 朗 (FUJIMAKI AKIRA)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20183931

研究成果の概要（和文）：高温超伝導体薄膜による非対称ナノブリッジと、それを並列化して特性向上を目指した整流用ダイオード素子について研究を進めた。非対称ナノブリッジは、**K**の形状をしたナノブリッジで、括れの部分からのみアブリコソフボルテックスがブリッジ内に進入可能なラチェット効果を示す。磁場を印加することによって、臨界電流が低減化する。高温超伝導体を用いた実験では、臨界電流の低減量は、ナノブリッジの幅が広いほど、また膜厚が厚いほど大きくなった。これは、線幅が実効的な磁場侵入長に近づくほど、括れ部分に電流が集中し、ラチェット効果が顕著になるためと解釈できる。この非対称ナノブリッジを並列接続した **SQUID** においては、外部磁場の増加に対し周期的な臨界電流の変調とともに、より大きな磁場領域での変調が観測された。これは、**SQUID** による臨界電流の低減効果とナノブリッジ単体の臨界電流低減効果が同時に観測されたことを意味する。今後は回路パラメータを最適化することによって、整流用に使えるようなダイオード素子を開発する。

研究成果の概要（英文）：We have studied on asymmetrical nano-bridges (ANBs) based on high-temperature superconducting films. The ANBs are expected to be act as a rectifier at high frequencies. The ANBs have "K" shapes in their geometry. Abrikosov vortices can enter the ANBs only at the constricted edges, so that the Ratchet effect appears at ANBs. The Ratchet effect leads to the reduction of the critical currents of ANBs under appropriate magnetic fields. We investigate the magnitude of the critical current reduction for different film thicknesses and different widths of ANBs. Experimental results show that the effective penetration depth is a key parameter to determine the characteristics of the ANBs. We also prepare SQUIDs consisting of two ANBs. We have observed long-term modulations in voltages generated across the SQUIDs together with periodic modulations when we increase applied magnetic fields. Although the large modulation depth of critical currents have not been observed, this result suggests that large reduction would be obtained after optimization of the circuit parameters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：超伝導エレクトロニクス

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、単一磁束量子回路、ボルテックス

## 1. 研究開始当初の背景

単一磁束量子 (SFQ) 回路は、次世代の高

速低消費電力集積回路として活発に研究が  
続けられている。実際、研究代表者らは世界

最高速(45GHz)、最大規模の SFQ 集積回路の動作実証に成功したほか、SFQ 回路の新しい低消費電力化法を提案、実証した。現在では、SFQ 回路は同じ周波数で動作する半導体集積回路に比べ、4-6 桁小さな消費電力で動作可能である。

しかしながら、室温の電源から見た SFQ 回路のインピーダンスは、典型的な値として  $0.1\ \Omega$  と極めて低インピーダンスとなる。その結果、室温電源部において電流制限抵抗が必要となり、結局そこで SFQ 回路自身の数百倍の電力を消費してしまう。この電源部での電力消費は、SFQ 回路本来の低電力性能の魅力が大きく損なわせる原因となっている。

電源部での電力消費を回避するには、交流で電力を供給し、超伝導回路によってインピーダンス変換回路ならびに整流回路を構成すれば良い。交流入力は、素子寸法を考慮すると、マイクロ波での入力が現実的である。マイクロ波領域ではインピーダンス変換回路は既に実現されていることから、マイクロ波周波数で動作し、かつ立ち上がり電圧  $0\ \text{V}$  のダイオードが実現できれば、SFQ 回路の課題が解決される。

## 2. 研究の目的

我々は、非対称形状高温超伝導ナノブリッジにおいて、ボルテックス（磁束量子）が一方方向からだけブリッジに進入する特性（ラチェット効果）を見出した。この効果を利用すると、上述のダイオードの構成が可能となる。本研究は、非対称ナノブリッジ、ならびに 2 並列の量子干渉素子（SQUID）を構成することで、実用に堪え得るダイオードの可能性を検討することを目的とした。加えて、電源回路の実用化に向けた課題も明らかにする。

## 3. 研究の方法

高温超伝導体ダイオードは、最終的には、幅数百 nm 程度の非対称ナノブリッジを直並列に配置することで形成する。その基本が、単体の非対称ナノブリッジと 2 並列の SQUID となる。

ダイオードの形成には、外部磁場によるナノブリッジ単体の臨界電流抑圧効果と SQUID 構造による臨界電流抑圧効果の両方を利用する。両者の磁場感度を近付ける必要性から、SQUID のホールのインダクタンスは低くする必要があり、やはり数百 nm 程度の寸法のホールが求められる。実際の実験では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) 薄膜に対し、電子ビーム描画装置によって高精度のパターニングを行い、その後 ECR プラズマによる

エッチングを通して、素子作製を行った。

再現性向上のためには、ECR プラズマエッチングの際に受ける端部の損傷を復元する必要がある。このために、加工後には、非常に薄い YBCO 薄膜を堆積し、損傷の影響を抑制した。

## 4. 研究成果

図 1 は試作した  $200\ \text{nm}$  幅の非対称ナノブリッジである。この素子の YBCO の膜厚は  $30\ \text{nm}$  である。図から分かるように、ブリッジは片側が直線、その反対側にはくびれ構造を有している。バイアス電流は、この非対称ナノブリッジ内を均一に流れることはなく、くびれに集中して流れるようになる。ナノブリッジの特性はアブリコソフボルテックス（磁束量子）がブリッジ内に侵入し、横断する振舞いで大まかには説明できる。くびれに集中したバイアス電流によって、磁束量子の侵入を妨げていた表面バリアの高さが低くなる。侵入したボルテックスは、バイアス電流からのローレンツ力を受け、逆側へと走行する。ボルテックスがナノブリッジ内に存在している間は、ボルテックス間の斥力のため、新たなボルテックスの侵入はない。これらの結果、図 1 でバイアス電流が上から下に流れている場合、1 個のボルテックスが必ず右から左へ走行する。

この状況下で外部磁場を紙面の表から裏方向に印加すると遮蔽電流がさらに表面バリアの高さを下げる。その結果、ナノブリッジの臨界電流が低下する。逆方向の磁場に対しては表面バリアの高さが上がり、臨界電流値は上昇する。これは物理的にはラチェット

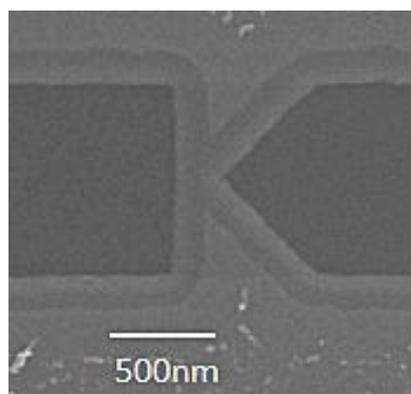


図 1 幅  $200\ \text{nm}$  の非対称ナノブリッジ

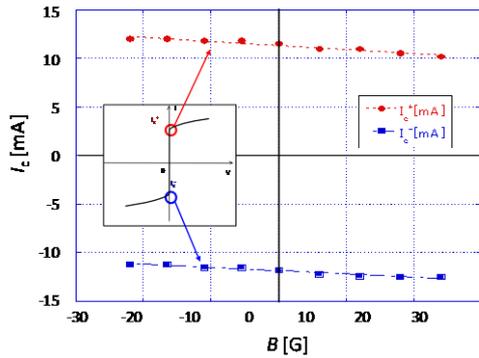


図2 非対称ナノブリッジの臨界電流値の磁場依存性。

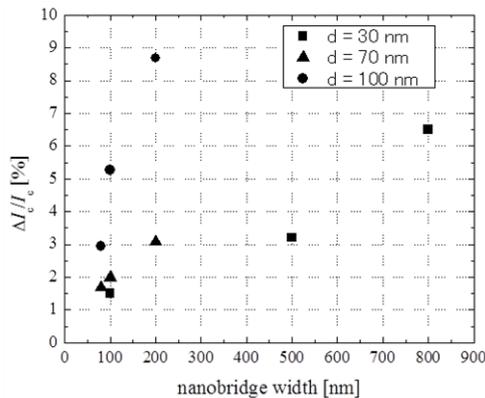


図3 非対称ナノブリッジの臨界電流低減量の線幅依存性. 膜厚も3種類変化させて実験を行った. 磁場は24 Gを印加.

効果となる。図2は、非対称ナノブリッジの臨界電流値の外部磁場依存性を調べた結果である。-22 Gから+34 Gまで外部磁場を変化させると一定の割合で臨界電流値が下がっている。これは、この範囲でラチェット効果が働いていることを示している。

図3は、外部磁場を24 G与えた条件下での臨界電流低減量 $\Delta I_c$ を、ナノブリッジの線幅を横軸に取り、表現したものである。なお、 $\Delta I_c$ は零磁場での臨界電流値 $I_c$ で規格化している。また、膜厚も変化させて、実験を行った。

図から明らかなように、同じ膜厚では、線幅の増加とともに臨界電流低減量は増加する。また、線幅200 nm一定とした場合には、膜厚の増加とともに、臨界電流低減量が増える。これらは、実効的な磁場侵入長が、ナノブリッジの特性を支配していることを示唆している。すなわち、実効的な磁場侵入長と線幅が同じ程度になった場合に、電流の偏りが大きくなり、結果として $\Delta I_c$ が大きくなる。

非対称ナノブリッジの単体の特性が明らかとなったので、SQUIDの評価も行った。図4は、膜厚70 nmのYBCO薄膜を利用し

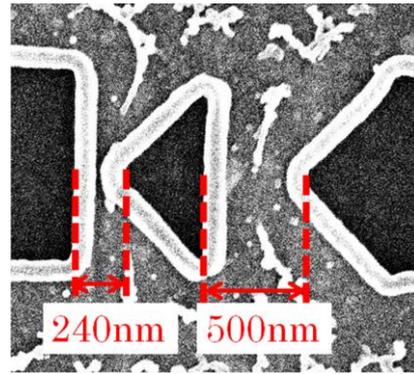


図4 非対称ナノブリッジによるSQUIDの顕微鏡写真

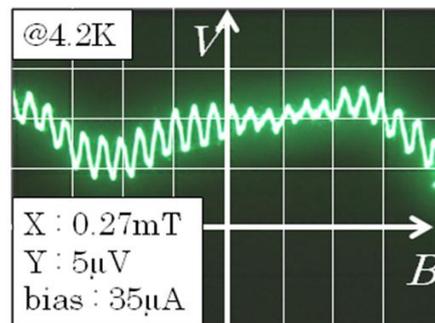


図5 非対称ナノブリッジSQUIDの発生電圧の外部磁場依存性

て作製した2並列SQUIDの顕微鏡写真である。2つの非対称ナノブリッジの線幅は、240 nmと500 nmである。

図5に作製したSQUIDの電圧-外部磁場( $V-\Phi$ )特性を示す。周期的な変調が観測されており、磁束量子1個単位でナノブリッジが動作していることが分かる。変調周期は0.86 Gであった。Focusing効果により、磁場感度は約20倍向上している。

$V-\Phi$ 特性は、単なる周期的変調以外に、より大きな磁場領域で電圧の変調が見られた。これは非対称ナノブリッジ自身の磁場特性が重畳していることを示唆している。図には現れていないが、磁場を増加させた場合と減少させた場合でヒステリシスが観測されており、ラチェット効果が変調パターンに影響を及ぼしていると考えられる。

しかしながら、現時点では大きな臨界電流の低減効果は観測されていない。今後はラチェット効果が十分に現れる数十 G程度の変調周期を目指し、ループサイズを縮小した非対称SQUIDを作製する必要がある。

##### 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1件)

- ① K. Kajino, K. Fujita, B. An, M. Inoue, and A. Fujimaki, “Ratchet Effect of Single Vortex Motion in Superconducting Asymmetrical Nanobridges,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, No. 5, 2012, DOI:10.1143/JJAP.51.053101, 査読有

[学会発表] (計16件)

- ① K. Kajino, B. An, T. Fukuoka, M. Inoue and A. Fujimaki, “The vortex ratchet effect in high- $T_c$  asymmetrical nanobridges under a magnetic field,” The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics, 2012. 10. 27-29, Yonezawa, Japan
- ② T. Fukuoka, K. Kajino, B. An, M. Inoue and A. Fujimaki, “High temperature superconductor vertically stacked Josephson junctions without excess currents for digital circuit applications,” The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics, 2012. 10. 27-29, Yonezawa, Japan
- ③ S. Mizoguchi, S. Tsutsumi, K. Kajino, H. Akaike, M. Inoue, and A. Fujimaki, “Numerical analysis on exclusion effect of vortices from superconducting thin films by using time-dependent Ginzburg-Landau equation,” The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics, 2012. 10. 27-29, Yonezawa, Japan
- ④ K. Kajino, K. Fujita, M. Yamamoto, B. An, T. Fukuoka, M. Inoue and A. Fujimaki, “Demonstration of Vortex Ratchet Effect in  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  Asymmetrical Nanobridges,” Applied Superconductivity Conference 2012, 2012. 10. 7-12, Portland, U. S. A.
- ⑤ M. Inoue, K. Kajino, S. Mizoguchi, B. An, T. Fukuoka, M. Yamamoto and A. Fujimaki, “Simulation Study on the Vortex Behavior in Asymmetrical Superconducting Films for Developing Nanobridge Devices,” Applied Superconductivity Conference 2012, 2012. 10. 7-12, Portland, U. S. A.
- ⑥ 福岡賢明, 安 保宇, 梶野顕明, 山本宗範, 井上真澄, 藤巻 朗, “電子ビーム照射型高温超伝導体ナノブリッジの作製,” 第73回応用物理学会学術講演会,

2012. 9. 11-14, 愛媛大学 (愛媛県)

- ⑦ 溝口翔太, 井上真澄, 藤巻 朗, “超伝導薄膜上における磁束排除効果のモート形状依存性の数値解析,” 第73回応用物理学会学術講演会, 2012. 9. 11-14, 愛媛大学 (愛媛県)
- ⑧ 山本宗範, 梶野顕明, 福岡賢明, 井上真澄, 藤巻 朗, “磁束集中効果が非対称ナノブリッジに及ぼす影響,” 第73回応用物理学会学術講演会, 2012. 9. 11-14, 愛媛大学 (愛媛県)
- ⑨ 福岡賢明, 梶野顕明, 安 保宇, 井上真澄, 藤巻 朗, “回路作製プロセスにおける高温超伝導積層ジョセフソン接合のばらつきの低減,” 第59回応用物理学関係連合講演会, 2012. 3. 15-18, 早稲田大学 (東京都)
- ⑩ 溝口翔太, 井上真澄, 藤巻 朗, “モートの形状による超伝導薄膜の磁束排除効果の数値解析,” 第59回応用物理学関係連合講演会, 2012. 3. 15-18, 早稲田大学 (東京都)
- ⑪ A. Fujimaki, K. Kajino, B. An, M. Yamamoto, and, M. Inoue, “Characteristics of HTS nanobridges with symmetric and asymmetric geometries,” International Workshop on Pathbreaking Phase Sciences in Superconductivity 2012, 2012. 1. 13-15, Osaka, Japan
- ⑫ A. Fujimaki, K. Kajino, B. An, M. Yamamoto and M. Inoue, Characteristics of HTS nanobridges with symmetric and asymmetric Geometries, International Workshop on Pathbreaking Phase Sciences in Superconductivity 2012, 2012. 1. 15, Osaka, Japan
- ⑬ Masumi Inoue, Saki Tsutsumi, Naoki Mitamura, Hiroyuki Akaike, and Akira Fujimaki, “Study on the Exclusion Effect of Magnetic Flux in a Superconducting Thin Film by Numerical Calculation Using the Time-dependent Ginzburg-Landau (TDGL) Equation,” Superconductivity Centennial Conference, 2011. 9. 18-23, Den Hage, Netherland
- ⑭ 梶野顕明, 安 保宇, 福岡賢明, 井上真澄, 藤巻 朗, “非対称ナノブリッジにおける電流電圧特性の磁場依存性,” 第72回応用物理学会学術講演会, 2011. 8. 29-9. 2, 山形大学 (山形県)
- ⑮ 福岡賢明, 梶野顕明, 安 保宇, 井上真澄, 藤巻 朗, “回路化プロセスにおける積層型ジョセフソン接合の特性評価,” 第72回応用物理学会学術講演会, 2011. 8. 29-9. 2, 山形大学 (山形県)

- ⑯ 安 保宇，梶野顕明，福岡賢明，井上真澄，藤巻 朗，“特性向上に向けた高温超伝導体ナノブリッジ作製プロセスの検討，” 第 72 回応用物理学会学術講演会，2011. 8. 29-9. 2，山形大学（山形県）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計 0 件）  
○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.super.nuqe.nagoya-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者なし

### (3) 連携研究者なし