

「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」  
平成14年度採択研究代表者

藤巻 朗

(名古屋大学 教授)

## 「単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクスの創製」

### 1. 研究実施の概要

将来の情報ネットワークを支える技術として高速性と低消費電力性を合わせ持つ単一磁束量子(SFQ)回路が有力な候補として挙げられる。実際、Nbを用いたSFQ回路では、数十GHzで動作するマイクロプロセッサやルータ用スイッチなどが実証され、その高いポテンシャルが認められつつある。本研究では、サブテラヘルツ領域での高速動作などSFQ回路のさらなる性能向上へ向け、課題となる幾つかの項目に的を絞り、高温超伝導体(HTS)のデバイス化の研究を進めている。

SFQ回路の集積化にもっとも重要な点は、能動素子であるジョセフソン接合の高品質化および制御性・再現性の確保である。本研究では、世界で唯一開発に成功している集積化に適した積層構造のジョセフソン接合を中心に、素子特性劣化の原因や再現性劣化の原因の特定作業を進め、その過程から上記要求を満たすような新たな作製プロセスを提案している。デバイス物理の理解を進めることも、性能向上へ向けての抜本的な方策と捕え、この観点からも研究を進めている。これまでに、HTSジョセフソン接合のトンネル障壁層の不安定要素を同定し、Pr、Ga元素添加によるその緩和策などを提案してきており、着実に研究は進んできている。

一方、SFQ回路をサブテラヘルツ領域で動作させる場合、そのボトルネックになるのが室温エレクトロニクスとのインターフェイス技術である。本研究では、光/SFQ変換、SFQ/光変換回路の基盤技術の確立を目指す。光入力では、低温に設置したフォトダイオードあるいはSMS構造光スイッチにより光/電気変換をし、その電流によりSFQを発生する。また、2波長の光のビート信号により数十GHzのクロック信号の生成も考える。ビート信号の生成はすでに確認しており、SFQ/光変換の高速動作実証を現在目指している。SFQ/光変換には、磁気光学効果による偏光を利用する。これには、磁束量子を光によって観測する技術が基礎となる。現在は、磁気光学顕微鏡を開発し、単一磁束量子の観察にまで至っており、空間分解能の向上とその高速計測が今後の課題となる。なお、SFQ/光変換では、磁束量子を小さいループに閉じ込める必要性があり、そこにはナノブリッジの適用を考えている。

## 2. 研究実施内容

本研究では、将来数百GHzで動作するSFQ回路の実現を目指し、ジョセフソン接合形成技術やナノブリッジ作製技術、インターフェイス技術などを中心に、物理からシステムまで広範な研究・開発を行う。全体で3つのグループから構成されており、以下、それぞれのグループごとに研究内容を記載する。

### ○高温超伝導体 (HTS) ジョセフソン接合グループ

本研究グループでは、集積化に有利な積層型HTSジョセフソン接合において、その素子パラメータの制御性・再現性を高め、チップ内ばらつきを抑える技術を開発するほか、接合の品質パラメータである $I_c R_n$ 積を向上させるための検討をすることが1つの目標となっている。また、光とのインターフェイスに必要な回路開発やナノブリッジの形成も手掛ける。

平成16年度までに、本グループが世界を先導している高温超伝導 (HTS) 積層ジョセフソン接合のばらつきの原因を特定し、いくつかの対応策を提案してきた。15年度には、下部電極となる $YBa_2Cu_3O_y$ の構成元素の一部置換が素子特性の再現性向上に対し効果があることを見出したが、16年度はさらにヘテロ材料となる $YbBa_2Cu_3O_y$ を上部電極に採用により、異相のないトンネル障壁が形成されること、またばらつきが低減化することなどを新たに見出した。また、ex-situプロセスによるトンネル障壁層の形成が再現性に悪影響を与えていると考え、in-situプロセスの提案を行った。障壁層形成のメカニズムは依然として不明であるものの、トンネル障壁の形成にはその下地となる下部電極表面が何らかのダメージを受けていることが必要条件となることを見出した結果に基づいている。提案したプロセスは低圧で酸素イオンを試料表面に照射することでダメージを与え、その後同一チャンバ内で上部電極の堆積に移行できる。この方法は特許申請に至っている。なお、このプロセスによってすでに特性ばらつきの小さいジョセフソン接合が形成されることは確認しており、今後は特性自身の改良と回路に有用な二重接合構造の試作へと移行する。

接合の物理に関しては、SFQ基礎グループと協力して研究を進めた。接合構造は実績のあるランプエッジ型 (薄膜の斜面に接合面を形成) を採用し、電極材料のキャリア密度を変化させて特性の変化を見た。16年度は、最適キャリア数よりキャリアを増やした状態 (オーバードープ) にして特性を評価した結果、臨界温度が低下したにもかかわらず $I_c R_n$ 積が変化しないことが分かった。これは、超伝導/トンネル障壁界面での特性劣化がオーバードープによって抑えられた可能性を示唆しており、継続して調査中である。

光インターフェイスについては、光インターフェイスグループと協力し平成17年度に行う回路の設計・試作まで進めた。現在はセットアップの構築中である。

### ○光インターフェイスグループ

SFQ論理回路用光入出力インターフェイスの構築のために、1.5  $\mu\text{m}$ 通信波長帯で応答可能な光伝導素子、光励起により生成された磁束の制御機構、および磁気-光信号変換

システムの開発を行った。これらについての成果を以下にまとめる。

光通信波長帯である波長 $1.5\mu\text{m}$ の光信号を効率よく電気信号に変換することが可能な光伝導素子としてInGaAs光伝導スイッチの開発を行った。InGaAsはバンドギャップが約 $0.73\text{eV}$ と小さいため波長 $1.5\mu\text{m}$ の光信号で励起が可能であるが、同時に抵抗が小さいため暗電流が大きく変換効率が低いという問題があった。我々は、深いアクセプターとして機能する鉄イオン注入によりInGaAsの高抵抗化をおこない、この素子の波長 $1.5\mu\text{m}$ のフェムト秒パルスレーザーに対する応答を詳細に検証し、InGaAsにおけるキャリアの振舞いを明らかにした。その結果、高い変換効率を持ち、かつ高速な波長 $1.5\mu\text{m}$ 対応光伝導スイッチの開発に成功した。

また、磁束量子の制御機構として超伝導フォトミキシング信号検出素子およびジョセフソン磁束フロートランジスタ(JVFT)を開発した。超伝導フォトミキシング信号検出素子では、フォトミキシングにより発生した数十GHzの光信号をフォトダイオードにより電流に変換し、ジョセフソン接合と磁気結合させることにより、シャピロステップとして検出した。その結果、最大50GHzの信号検出に成功した。また、ジョセフソン接合中を走行する磁束量子を利用するJVFTは、これまで直流電流入力による静的特性が主に評価されてきたが、我々は250kHzのパルス波および1MHzの正弦波などの交流信号を入力しその出力波形を計測した。その結果、上記の周波数においてJVFTは良好に動作することを確認した。また、得られた素子パラメータを元に解析した結果、数十GHzでの動作が可能であることを示した。

また、光出力インターフェイスを念頭に置いた、オリジナルな磁気光学(MO)顕微鏡の開発を行った。その結果、高温超伝導体薄膜試料中の単一磁束量子のイメージングに初めて成功した。このように、開発したMO顕微鏡が単一磁束量子(SFQ)の検出に十分な感度および空間分解能を有していることが確認された。また、高速磁束検出のため光源にレーザー光を用いたシステムを試作し、超伝導体薄膜中の磁場分布の観測に成功した。このように、磁気光学効果を用いた光出力インターフェイス開発に向けての基盤技術の開発に成功した。

#### ○SFQ基礎グループ

広くキャリア濃度を変化させることのできる $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{CuO}_3$ 薄膜によりジョセフソン接合を作製し、それにより伝導機構等の接合の物理を解明することを目的として研究を進めている。作成装置の改良により安定した薄膜を得ることに成功した。現在、ジョセフソン接合グループと協力して接合を作製する段階へと進めている。

一方、BSCCO系固有接合を作成し、臨界電流の分布の測定をおこなった。低温になると、接合が複数個作成されていることによる分布の広がりが見えたので、今後接合の形状などを工夫し、あらゆる温度領域で接合一個だけのジョセフソントンネル効果がみえるようにする必要がある。

さらに、異方的超伝導体と常伝導体接合における近接効果の研究を行った。界面で形

成される異方的超伝導体特有のアンドレーエフ共鳴状態は、銅酸化物超伝導体のような d 波超伝導体では、近接効果と競合することが明らかになった。対照的にトリプレットの超伝導体ではお互いが共存することが解明された。また超伝導体接合における熱伝導の理論も展開した。さらに強磁性体と超伝導体の接合における近接効果、トンネル効果の研究も行った。将来の量子ビットの研究も視野に入れて銅酸化物超伝導体における巨視的量子トンネル効果の研究も行った。

### 3. 研究実施体制

#### 高温超伝導体ジョセフソン接合グループ

- ① 研究分担グループ長：藤巻 朗（名古屋大学大学院工学研究科、教授）
- ② 研究項目：高温超伝導ジョセフソン接合の開発

#### 光インターフェイスグループ

- ① 研究分担グループ長：斗内 政吉（大阪大学超伝導フォトンクス研究センター、教授）
- ② 研究項目：フォトミキシング磁束量子発生ゲートおよび磁束量子ダイナミック観測システムの開発

#### SFQ基礎グループ

- ① 研究分担グループ長：前田 京剛（東京大学大学院総合文化研究科、助教授）
- ② 研究項目：高温超伝導体によるジョセフソン接合等の物理の解明と開発指針の提案

### 4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

#### (1) 論文発表

- Y. Yoshinaga, S. Izawa, K. Wakita, T. Ito, M. Inoue, A. Fujimaki and H. Hayakawa  
"Investigation of the electrical properties of vertically stacked interface-treated Josephson junctions"  
Superconductor Science and Technology **17** (4), 653-656 (2004).
- Y. Asano, Y. Tanaka and S. Kashiwaya  
"A Phenomenological Theory of Zero-energy Andreev Resonant States"  
Physical Review B **69** (13), 134501-1 - 134501-11 (2004).
- Y. Tanaka, Y.V. Nazarov, A. Golubov and S. Kashiwaya  
"Theory of charge transport in diffusive normal metal / unconventional singlet superconductor point contacts"  
Physical Review B **69** (14), 144519-1 - 144519-16 (2004).
- Y. Asano, Y. Tanaka and S. Kashiwaya  
"Split of zero-bias conductance peak in normal-metal / d-wave super-

- conductor junctions”  
Physical Review B **69** (21), 214509-1 - 214509-12 (2004).
- Y. Tanaka and S. Kashiwaya  
“Anomalous charge transport in triplet superconductor junctions”  
Physical Review B **70** (1), 012507-1 - 012507-4 (2004).
- Y. Tanaka and K. Kuroki  
“Microscopic theory of f-wave pairing in quasi-1D organic superconductors”  
Physical Review B **70** (6), 060502-1 - 060502-4 (2004).
- H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, B. Prijamboedi, A. Sawa, I. Kurosawa, Y. Tanaka and I. Iguchi  
“Anomalous magnetic field tunneling of YBCO junctions -Possible detection of non-Fermi-liquid states-”  
Physical Review B **70** (9), 094501-1 - 094501-5 (2004).
- S. Kawabata, S. Kashiwaya, Y. Asano and Y. Tanaka  
“Macroscopic quantum tunneling and quasiparticle dissipation in d-wave superconductor Josephson junctions”  
Physical Review B **70** (13), 132505-1 - 132505-4 (2004).
- Y. Asano, Y. Tanaka, Y. Tanuma, K. Kuroki and H. Tsuchiura  
“Josephson Effect in Quasi One-dimensional Unconventional Superconductors”  
Journal of the Physical Society of Japan **73** (7), 1922-1930 (2004).
- Y. Tanaka, Y. Asano and S. Kashiwaya  
“Impurity scattering effect on the charge transport on high  $T_c$  cuprate junctions”  
Fizika Nizkikh Temperatur **30** (7/8), 780-794 (2004).
- T. Kiwa and M. Tonouchi  
“Real-time monitoring of a photomixing signal using a high- $T_c$  Josephson junction”  
Superconductor Science and Technology **17** (8), 998-1002 (2004).
- Y. Doda, T. Kiwa, I. Kawayama, H. Murakami and M. Tonouchi  
“Pulse current response of high- $T_c$  superconducting vortex flow transistors”  
Chinese Journal of Physics **42** (4-II), 458-462 (2004).
- Y. Tominari, H. Murakami and M. Tonouchi  
“Terahertz Radiation Properties of Underdoped  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  Thin Films”  
Chinese Journal of Physics **42** (4-II), 561-566 (2004).
- K. Ueno, H. Murakami, Y. Doda, I. Kawayama, M. Tonouchi and N. Chikumoto  
“Magneto-Optical Imaging System to Study Vortex Dynamics in High-  $T_c$  Superconductor Devices”

Chinese Journal of Physics **42** (4-II), 567-571 (2004).

- R. Inoue, K. Miwa, H. Kitano, A. Maeda, Y. Odate and E. Tanabe,  
"Highly accurate and real-time determination of resonant characteristics:  
complex linear regression of the transmission coefficient"  
IEEE Transactions on Microwave Theory and Technologies **52** (9), 2163-2168  
(2004).
- H. Kitano, T. Ohashi, H. Ryuzaki, A. Maeda and I. Tsukada,  
"Frequency dependent microwave conductivity of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  thin films"  
Physica C **412-414**, 130-133 (2004).
- Y. Asano, R. Sekiguchi, Y. Tanaka, S. Kashiwaya and H. Tsuchiura  
"Zero-bias Peak in Tunneling Spectra of High- $T_c$  Superconductors and its  
Splitting"  
Physica C **412-414**, 157-161 (2004).
- Y. Tanuma, K. Kuroki, Y. Tanaka and S. Kashiwaya  
"Study of the Tunneling effect on Quasi 2D Organic Superconductors  $\kappa$ -  
(ET) $_2X$ "  
Physica C **412-414**, 178-181 (2004).
- Y. Asano, Y. Tanuma, Y. Tanaka, K. Kuroki, H. Tsuchiura and S. Kashiwaya  
"Josephson Effect in quasi one dimensional superconductor (TMTSF) $_2X$ "  
Physica C **412-414**, 212-216 (2004).
- K. Sakamoto, Y. Asano, Y. Tanaka, H. Tsuchiura, J. Inoue and S. Kashiwaya  
"Mesoscopic Fluctuations of Josephson Current in High- $T_c$  Superconductor  
Junctions"  
Physica C **412-414**, 221-224 (2004).
- Y. Asano, Y. Tanaka, Y. Matsuda, S. Kashiwaya. and H. Tsuchiura  
"Conductance in Normal-metal /  $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ "  
Physica C **412-414**, 235-239 (2004).
- A. Sugimoto, S. Kashiwaya, H. Eisaki, H. Tsuchiura and Y. Tanaka  
"STM/STS Observation of Pb-Doped Bi-2212 Single Crystals"  
Physica C **412-414**, 270-274 (2004).
- H. Kashiwaya, K. Ikeda, B. Projamboedi, S. Kashiwaya, I. Kurosawa, H.  
Tsuchiura and Y. Tanaka  
"Magnetic Field Tunneling Spectroscopy of YBaCuO/LaSrMnO Junction"  
Physica C **412-414**, 275-278 (2004).
- Y. Tanuma, Y. Tanaka and S. Kashiwaya  
"Proximity effect on the interface of normal metal / d-wave super-  
conductors"

- Physica C **412-414**, 319-323 (2004).
- Y. Asano, Y. Tanaka, Y. Tanuma, K. Kuroki, H. Tsuchiura and S. Kashiwaya  
 "Tunneling Effect in triangular lattice superconductor  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$ "  
 Physica C **412-414**, 412-414 (2004).
  - K. Kinoshita, H. Kitano, A. Maeda, T. Nishizaki, M. Maeda, K. Shibata and N. Kobayashi,  
 "Impurity effect on the electronic state of the vortex core in the mixed state of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ,"  
 Physica C **412-414**, 530-534 (2004).
  - K. Ueno, H. Murakami, I. Kawayama, Y. Doda, M. Tonouchi and N. Chikumoto  
 "Magneto-optical imaging of magnetic flux distribution in high- $T_c$  superconductors"  
 Physica C **412-414**, 1343-1348 (2004).
  - T. Miyadera, T. Kiwa, I. Kawayama, H. Murakami and M. Tonouchi  
 "Ultrafast optical study of amorphous Ge thin films for superconductor/semiconductor hybrid devices"  
 Physica C **412-414**, 1602-1606 (2004).
  - A. Maeda, H. Kitano and R. Inoue,  
 "Microwave conductivities of high- $T_c$  oxide superconductors and related materials"  
 Journal of Physics: Condensed Matter, **17** (4), R143-R185 (2005).
  - M. Suzuki and M. Tonouchi  
 "Fe-implanted InGaAs terahertz emitters for 1.56  $\mu\text{m}$  wavelength excitation"  
 Applied Physics Letters **86** (5), 051104-1 - 051104-3 (2005).
  - A. Maeda, Y. Inoue, H. Kitano, S. Savel'ev, S. Okayasu, I. Tsukada and F. Nori,  
 "Nanoscale Friction : Kinetic Friction on Magnetic Flux Quanta and Charge Density Waves"  
 Physical Review Letters **94** (7), 077001-1 - 077001-4 (2005).

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：1件（CREST研究期間累積件数：2件）