

「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、各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_cR_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15年度まで、 $YBa_2Cu_3O_y$ (YBCO) による積層型およびランプエッジ型ジョセフソン接合のばらつきの原因を探り、これまでに指摘されていない原因を特定した。積層型接合では、TEM観察により障壁層での Y_2O_3 などの異相の形成が見られ、これが均一性の障害になっていることを見出した。また、比較的良好な特性のものには明瞭なトンネル障壁層は観測されないものの、障壁層近傍はY-richのことが明らかとなった。この結果は、逆位相境界などの結晶の不完全性が障壁層で形成されていることを示唆している。さらに、異なるプロセスによる実験との比較により、上記結晶の不完全性の形成にはYBCOの前駆体的な構造が不可欠であることが示唆される。これまでに障壁層母材へのPrやGa元素の添加が異相形成を抑えることを見出し、加えて現在前駆体的構造の形成法を追求している。一方、ランプエッジ型接合ではベース電極膜の膜厚方向の障壁層の厚みの変化が確認されている。接合の界面形成は積層型と同じであるとすると、この障壁層の不均一性の緩和には積層型と同じプロセスが要求されることになり、プロセスの容易性というランプエッジ型接合の利点が失われる可能性もある。

一方、再現性の向上や I_cR_n 積の向上へ向け、電極薄膜や障壁層母材への元素添加効果を調べている。すでに他の研究機関で公表されているが、YBCO電極へのLa添加による平坦性の向上や、YのYbへの置換による成膜温度の低下が確認されている。現在、YBCO電極へのCa添加によりキャリア数を制御し、超伝導体/障壁層界面での超伝導性の劣化を抑える検討を進めている。

○光インターフェイスグループ

本研究グループではSFQ回路用光インターフェイスの構築のため、フォトミキシングを用いた磁束量子発生ゲートおよび磁気光学顕微鏡を用いた磁束量子ダイナミック観測システムの開発を行った。

フォトミキシング磁束量子発生ゲートの開発

我々の提案するSFQ回路用光入力インターフェイスは、フォトミキシング技術を用いて光信号を高周波電気信号へと変換し、ジョセフソン接合と結合させることによりSFQ

信号を発生させるものである。2台の半導体レーザーを、光ファイバーケーブルを用いて重ね合わせることで、その差周波数に相当する周波数の光ビートが発生する。そのレーザービートをフォトダイオードなどのフォトミキサーに入射させると、高速で光電流が変調され、ジョセフソン接合と結合させることにより、SFQ発生ゲートとして動作可能である。15年度は、フォトミキシングにより発生する高周波電磁波の周波数を、ジョセフソン接合を用いて検出し、低損失・高周波対応のフォトミキシングシステムの構築を行った。開発したシステムでは、信号伝達の大部分の経路を光ファイバーによる光伝送としたため、低損失かつ高周波数動作が可能となった。実験では、フォトダイオードの動作限界である最大51.7GHzの信号検出に成功している。

光入力インターフェイスの開発に関しては、実用化を目指したNb-SFQ回路において要求される数十GHzの動作速度の達成に向けての基本技術はほぼ確立できた。今後は、実際にSFQ論理回路と接続し、SFQの発生・制御を行う予定である。また、HTS-SFQ回路においても原理的に動作実証を行う予定である。

磁束量子ダイナミック観測システムの開発

光出力インターフェイスへの応用を念頭におき、磁気光学効果を用いた、磁束量子ダイナミック観測システムの開発を行っている。このシステムでは、磁気光学効果により偏光面が回転することを利用し、局所的な磁束分布の動的観測を行うことが可能である。これまで、結晶粒界への磁束の侵入などの様子を観測してきたが、15年度はCCDカメラ、光学系、照明などを改良することにより高分解能化を行い、磁束量子の観測に成功した。図1は65Kにおいて、LPE法を用いて作製したBSCCO薄膜を、本システムを用いて観測した結果である。1 μm 以下の空間分解能を達成し、磁束量子と思われるドットパターンが三角格子を形成していることが分かる。

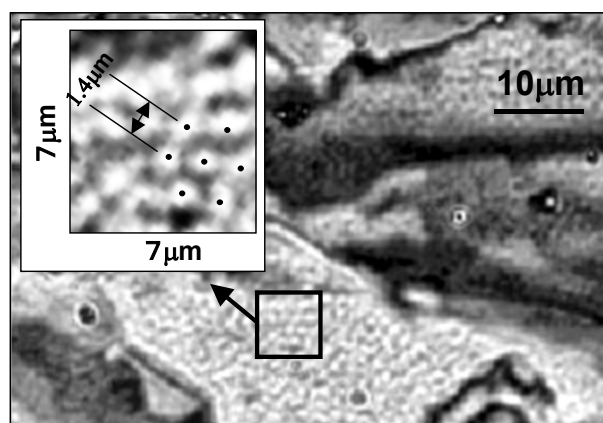


図1 BSCCO薄膜の磁束分布

今後、光源や検出法を見直し改良することによって、より高い時間分解能で磁束量子の検出を目指し、光出力インターフェイス開発への基盤となるデータを蓄積する。

○SFQ基礎グループ

本グループでは、高温超伝導体を用いたSFQデバイスの特性向上に向けて、物理的な視点から高温超伝導体ジョセフソン接合の基礎特性を明らかにすべく、キャリア密度の連続的な変化が可能な高温超伝導体薄膜の $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) 薄膜作製を開始した。パルスレーザー蒸着装置を導入し、 $\text{LaSrAlO}_4(001)$ 基板を用い、LSCO系としては現在入

手可能な最高品質の薄膜に近い、超伝導臨界温度 $T_c=38$ K(ゼロ抵抗)、転移幅 1 K未満の薄膜試料を作製することに成功した。現在、基板加熱装置の改良を行い、高品質のLSCO薄膜試料をHTS接合グループへ安定供給出来るよう準備を進めている。

一方、高温超伝導体のジョセフソン接合の物理の理解を理論的観点からも進めている。銅酸化物超伝導体と常伝導金属接合系の電気伝導の理論は不純物散乱がないバリステックな場合は、この10年間の研究でかなり整備されてきた。しかし不純物散乱が含まれるときには不十分であった。そこで、特に常伝導体での電気抵抗の効果、いわゆる近接効果の効果も取り入れた電気伝導の新しい理論の構築を行った。またジョセフソン電流に不純物散乱の与える影響も調べた。その結果、アンドレーエフ反射に起因する共鳴状態が現れるときにはジョセフソン電流の値の揺らぎは非常に大きくなることが解明された。また我々の理論を Sr_2RuO_4 のようなトリプレット超伝導体の接合に適用するときわめて新しい量子効果が存在することが解明されている。

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ニクス研究センター、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. Tanaka, Yu. V. Nazarov and S. Kashiwaya
"Circuit Theory of Unconventional Superconductor Junctions"
Physical Review Letters **90** (16), 167003-1 - 167003-4 (2003).
- Y. Tanaka, Y. Asano, Y. Tanuma, K. Kuroki and S. Kashiwaya
"Charge transport in unconventional superconductor junctions"
Journal of Low Temperature Physics **131** (3/4), 461-470 (2003).
- H. Murakami, Y. Tominari, M. Tonouchi, T. Yasuda, H. Wald, P. Seidel and H. Schneidewind

- “Ultrafast optical response of TBCCO(2212) thin films”
 Physica C **388–389**, 467–468 (2003).
- H. Murakami, T. Kiwa, M. Tonouchi and T. Yasuda
 “THz imaging of supercurrent distribution in Meissner state of LPE-BSCCO film”
 Physica C **388–389**, 479–480 (2003) .
- N. Kida and M. Tonouchi
 “THz spectroscopic evidence for a charge-density-wave formation in a charge-ordered manganite $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ ”
 Physica B **329–333**, 842–843 (2003).
- T. Kiwa, Y. Kamata, M. Misra, H. Murakami and M. Tonouchi
 “Backscattered Terahertz Radiation Imaging System to Visualize Supercurrent Distributions”
 IEEE Transaction on Applied Superconductivity **13** (2), 3675–3678 (2003).
- Y. Tominari, T. Kiwa, Murakami, M. Tonouchi, H. Wald, P. Seidel and H. Schneiderwind
 “THz Radiation Properties of $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ Thin Films Excited by Femtosecond Laser Pulses”
 IEEE Transaction on Applied Superconductivity **13** (2), 3730–3733 (2003).
- N. Kitaura, H. Itoh, Y. Asano, Y. Tanaka, J. Inoue, Y. Tanuma and S. Kashiwaya
 “Influence of Impurity-Scattering on Tunneling Conductance in d-Wave Superconductors with Broken Time Reversal Symmetry”
 Journal of Physical Society of Japan **72** (7), 1718–1723 (2003).
- S. Shirai, H. Tsuchiura, Y. Asano, Y. Tanaka, J. Inoue, Y. Tanuma and S. Kashiwaya
 “Josephson Effect in d-Wave Superconductor Junctions in a Lattice Model”
 Journal of Physical Society of Japan **72** (9), 2299–2307 (2003).
- I. Kawayama, T. Miyadera, Y. Doda, T. Kiwa, H. Murakami and M. Tonouchi
 “Optical response of amorphous Ge photoconductive switches with YBCO transmission lines”
 Superconductor Science and Technology **16** (11), 1475–1478 (2003).
- T. Kiwa, H. Murakami and M. Tonouchi
 “Generation of sub-terahertz waves using a semiconductor photomixer”
 Superconductor Science and Technology **16** (12), 1540–1543 (2003).
- Y. Tominari, T. Kiwa, Murakami, M. Tonouchi, H. Wald, P. Seidel and H. Schneiderwind

“Coherent THz radiation from Tl-221 thin films excited by optical laser pulse under magnetic field”

Physica C **388-389**, 481-482 (2003).

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数：1 件（CREST研究期間累積件数：1 件）