

「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 を用いた回路では、数十 GHz で動作するマイクロプロセッサなどが実証され、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 回路の集積化に対して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品質化および制御性・再現性の確保である。本研究では、性能向上阻害要因を実験・理論の両面から検討した。その過程の中で、現在の作製法による HTS ジョセフソン接合のトンネル障壁は、下部電極表面が元素置換によって絶縁体化することで形成されることを明らかにした。また、品質の向上には急峻な超伝導／絶縁体界面の形成が重要であることを見出した。この観点から、下部電極に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 、上部電極に $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ を用いた積層形状ジョセフソン接合において歩留まり等の低減効果を確認したほか、下部電極に LaSrCuO_3 、上部電極に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ を用いたランプエッジ形状の接合において急峻な界面形成に超伝導電極のホール密度も関与している可能性を指摘した。さらに、積層形状接合では、HTS の特長を活かし、かつ SFQ 回路出力の増幅器に適用可能な二重接合の作製にも成功した。

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している。光入力では、低温に設置したフォトダイオード等により光/電気変換をし、その電流により SFQ を生成する。現在までに、2 波長の光のビート信号により 90GHz の光混合信号の発生をジョセフソン検出器で確認した。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、静止した SFQ の観察

にまで至っている。

2. 研究実施内容

○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 HTS 積層型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目標の 1 つとなっている。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。

これまでに、HTS 積層ジョセフソン接合の性能劣化や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。特に現在の接合作製法においては、プラズマによって損傷を受けた下部電極表面の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ が、その後のプロセス時に構成元素の一部に置換が起こり、それがトンネル障壁層として働くことが見出された。実際、上部電極にのみ $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ を用いることで置換が促進され、均質なトンネル障壁層の形成とばらつきの低減化が確認されている。一方、積層ジョセフソン接合を二重に重ね、かつ中間の超伝導電極の厚さを薄くすると、2つの接合が同期して振舞うことが我々の以前の Nb 接合の研究で分かっていた。同期現象を利用すると 20GHz 程度までの SFQ 出力インターフェイス回路（電気出力）が構成可能となる。Nb 接合の場合は、中間層の厚さを薄くすると、臨界温度も低下してしまう点が問題であったが、HTS ではコヒーレンス長が短いため、この問題は回避できる。図 1 は実際に作製した二重接合と単独接合の比較を $I_c R_n$ 積の臨界電流密度依存性で見たものである。同じ臨界電流密度で二重接合は 2 倍の $I_c R_n$ 積を示しており、さらに電流-電圧 (I - V) 特性、磁場応答から同期現象が確認されている。

接合の物理および光インターフェイス

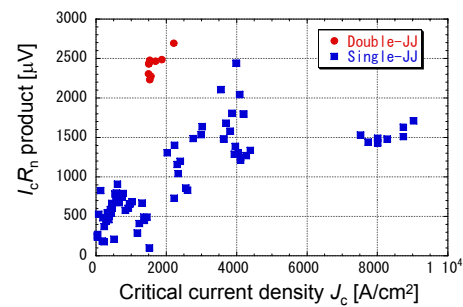


図 1 二重接合と単独接合の $I_c R_n$ 積と臨界電流密度の関係。

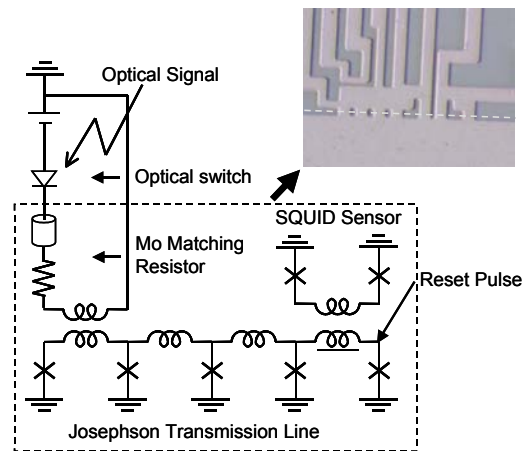


図 2 光/SFQ インターフェイスシステムの回路図および素子の電子顕微鏡写真

の実験に関しては、SFQ 基礎グループおよび光インターフェイスグループと協力して研究を進めた。内容については、同グループの欄で報告する。

○光インターフェイスグループ

1)SFQ 光入力インターフェイスおよびその周辺技術の研究開発

サブテラヘルツの信号を容易に発生できる光ミキシング技術を利用した光信号のジョセフソン素子への入力システムを開発している。これまで、高速なフォトダイオードを用いることにより 90GHz を超える信号入力・検出に成功した。また、HTS 接合グループとも協力し、フェムト秒光パルス信号を用いた光/SFQ 入力インターフェイスを設計し、その特性を検証した。図2はその回路図と電子顕微鏡写真である。このシステムでは、光パルスにより SFQ を発生させ、リセットパルスにより消去する。システム検証のため、まず電気信号入力により実験した結果、ほぼ期待通りの動作が確認された。

2)磁束量子ダイナミック観測システムの開発と SFQ 光出力インターフェイスへの応用

これまで独自に構築した磁気光学顕微鏡を使って、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 中の磁束量子分布の観測に成功してきた。H17 年度は、この技術をさらに進め SFQ の高速・高感度光検出システムの構築に向け、超伝導デバイス中の局所領域における磁束量子の動的な状態を観測可能な、レーザーを使った高感度磁気検出システムのプロトタイプを開発した。その感度についてさらに詳細な研究を行った結果、この簡易型のプロトタイプシステムでも数 mA の電流によって発生する磁界の検出が可能であることを確認した。また、この高感度磁気検出のためには用いる磁気光学材料の最適化が重要であるが、作成したガーネット膜の磁気光学特性、光学特性の評価を詳細に行った結果、検出感度の上で重要な要素であるウェルデ定数(単位磁場あたりのファラデー回転角を表すパラメータ)が膜作成時のスピコート回数の制御で制御できることが分かった。さらに SFQ により偏光を受けた光信号が、検出に光電子増倍管を用いれば高 SN 比でしかもナノ秒スケールの時間オーダーで超高速検出可能であることが判明した。

一方、光出力では、磁束密度を上げるため小さい面積の超伝導リングに SFQ を閉じ込める必要があるほか、SFQ のリングへの出入りを高速に制御する必要がある。この条件を満たすため、ナノブリッジの作製を目指している(HTS 接合グループ・近大担当)。これまで電子ビーム描画を利用した HTS 薄膜のナノ加工プロセスを検討し 80nm の線幅のブリッジによる $400\text{nm} \times 100\text{nm}$ のホールを持つリングの作製に成功した。現時点では特性の劣化が見られており、その対策を進めているところである。

○SFQ 基礎グループ

1)薄膜試料の超伝導特性評価

次項で示すように、パルスレーザー蒸着法で作成した HTS 薄膜でジョセフソン接合を作製し、 $I-V$ 特性を温度の関数として測定し、接合の諸パラメータと薄膜特性の関連を整理す

ることが本研究グループの目的の一つとなっている。H17 年度は、薄膜自身の超伝導性を明らかにするため、薄膜のキャリア密度を変化させ、マイクロ波ブロードバンド法を用いて複素交流伝導度を詳細に測定した。その結果、キャリア密度を変化させると超伝導状態が質的变化する（ユニバーサリティークラスの変化）ことが初めて見出された。

2) 接合特性評価

(1) ランプエッジ接合特性のキャリア濃度依存性の研究

さらに、HTS 接合グループと協力して、最適ドーブ（最適なキャリア密度）、過剰ドーブの試料でジョセフソン接合を作製し、 $I-V$ 特性の評価を行った。その結果、高温超伝導体接合としてはきわめてまれな、ジョセフソン電流と準粒子超伝導ギャップの両方が観測されるような接合を過剰ドーブの試料に対して作製することに成功した。今後、再現性を含め解析を進めていく。

(2) 固有ジョセフソン接合の特性研究

Bi 系高温超伝導体固有接合でメサ構造を作製し、 $I-V$ 特性の測定を行った。現時点では、いわゆる‘大きな接合’しかできておらず、さらに高度な微細加工技術の導入が必要である。このため他研究機関と共同で集束イオンビームを用いた加工を開始した。

(3) 理論的研究

銅酸化物超伝導体におけるジョセフソン効果の計算をより現実的な界面モデルに基づき計算した。界面の近くに形成されるアンドレーエフ共鳴状態が近接効果にいかなる影響を与えるのかを解明した。この共鳴状態は、バリスティックな接合と Diffusive な接合ではかなり異なった振舞いをする。Diffusive な接合では、競合関係のために、ジョセフソン電流は低温で減少することを明らかにした。また界面に形成される乱れた金属層の存在が $I_c R_n$ 積を著しく低下させることも明らかにした。さらに Sigrist Rice の現象論的な公式がいかなる場合に成立するのかも解明した。

3. 研究実施体制

HTS 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：

- 1) 高温超伝導ジョセフソン接合の開発
- 2) SFQ 光出力インターフェイス用ナノブリッジの開発
- 3) SFQ 光入力回路の開発（光インターフェイスグループと共同）
- 4) 高温超伝導ジョセフソン接合の物理の解明（SFQ 基礎グループと共同）

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：

- 1) SFQ 光入力インターフェイスおよびその周辺技術の研究開発

2) 磁束量子ダイナミック観測システムの開発と SFQ 光出力インターフェイスへの応用

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：

- 1) キャリア密度を変化させた薄膜試料の作成及び超伝導特性、特に高周波伝導度などの評価
- 2) HTS ジョセフソン接合の特性評価 (I-V 特性, ノイズ, 高周波測定) と異方的超伝導体のジョセフソン効果の理論的研究による特性改善の方向性提示及び検証
- 3) 固有ジョセフソン接合の作製と特性評価

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

- M. Suzuki and M. Tonouchi
"Fe-implanted InGaAs terahertz emitters for 1.56 μm wavelength excitation"
Applied Physics Letters **86** (5), 051104 (2005).
- A. Maeda, Y. Inoue, H. Kitanok S. Okayasu, I. Tsukada:
"Study of kinetic friction of solid using driven lattice of quantized vortex in high-temperature superconductors-a new route to study solid-solid friction-"
International Journal of Modern Physics B **19** (1-3), 463-470 (2005).
- 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).
- A. Maeda, Y. Inoue H. Kitano, S. Savelev, 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).
- Y. Tanaka, S. Kashiwaya and T. Yokoyama
"Theory of enhanced proximity effect by midgap Andreev resonant state in diffusive normal metal / triplet superconductor junctions"
Physical Review B **71** (9), 094513_1-16 (2005).
- T. Yokoyama, Y. Tanaka, A. A. Golubov, J. Inoue and Y. Asano
"Influence of magnetic impurities on charge transport in diffusive normal metal / superconductor junctions"
Physical Review B **71** (9), 094506_1-9 (2005).
- M. Inoue, Y. Yoshinaga, K. Wakita, K. Taniike, T. Kimura, A. Fujimaki and H. Hayakawa

- "Analysis of the Barrier in Vertically-Stacked Interface-Treated Josephson Junctions"
IEEE Transactions on Applied Superconductivity **15** (2), 141-144 (2005).
- T. Kimura, K. Wakita, Y. Yoshinaga, K. Taniike, T. Nishitani, M. Inoue, A. Fujimaki and H. Hayakawa
"Vertically-Stacked Josephson Junctions Using YbBa₂Cu₃O_{7-x} as a Counter Electrode for Improving Uniformity"
IEEE Transactions on Applied Superconductivity **15** (2), 145-148 (2005).
 - Y. Asano, Y. Tanaka, M. Sigrist and S. Kashiwaya
"Josephson interferometer in a ring topology as a proof of the symmetry of Sr₂RuO₄"
Physical Review B **71** (21), 214501_1-7 (2005).
 - T. Watanabe, T. Miyata, H. Yokoyama, Y. Tanaka and J. Inoue:
"Nonmonotonic d_{x₂-y₂}-wave Superconductivity in Electron-Doped Cuprates Viewed from the Strong-Coupling Side"
Journal of the Physical Society of Japan **74** (7), 1942-1945 (2005).
 - T. Yokoyama, Y. Tanaka and A. A. Golubov
"Resonant peak in the density of states in normal-metal / diffusive ferromagnet / superconductor junctions"
Physical Review B **72** (5), 052512_1-4 (2005).
 - S. Kawabata, S. Kashiwaya, Y. Asano and Y. Tanaka
"Effect of zero-energy bound states on macroscopic quantum tunneling in high- T_c superconductor junctions"
Physical Review B **72** (5), 052506_1-4 (2005).
 - Y. Togawa, K. Harada, T. Akashi, H. Kasai, T. Matsuda, F. Nori, A. Maeda and A. Tonomura
"Direct observation of rectified motion of vortices in a niobium superconductor"
Physical Review Letters **95** (8) 087002-1- 087002-4 (2005).
 - T. Ohashi, H. Kitano, A. Maeda and R. Inoue
"Effect of thermal expansion in microwave conductivity measurement"
Physica C **426-431**, 240-245 (2005).
 - M. Inoue, K. Taniike, T. Kimura and A. Fujimaki
Study on the barrier formation of vertically-stacked interface-treated junctions
Physica C **426-431**, 1508-1513 (2005).
 - T. Miyadera, I. Kawayama, T. Kiwa, K. Tsukada and M. Tonouchi
"Frequency detection of focused sub-THz waves using a high- T_c Josephson junction"
Physica C **426-431**, 1726-1730 (2005).
 - Y. Tanaka, Y. Asano, A. A. Golubov and S. Kashiwaya

- “Anomalous features of the proximity effect in triplet superconductors”
Physical Review B **72** (14), 140503_1-4 (2005).
- T. Yokoyama, Y. Tanaka, A. A. Golubov and Y. Asano:
“Theory of thermal and charge transport in diffusive normal metal/superconductor junctions”
Physical Review B **72** (21), 214513_1-15 (2005).
 - T. Yokoyama, Y. Tanaka and J. Inoue:
“Intrinsically s-wave like property of triplet superconductors with spin-orbit coupling”
Physical Review B **72** (22), 220504_1-4 (2005).
 - M. Takigawa, M. Ichioka, K. Kuroki and Y. Tanaka
“Electronic structure and spontaneous internal field around nonmagnetic impurities in spin-triplet chiral p-wave superconductors”
Physical Review B **72** (22), 224501_1-6 (2005).
 - Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi
"DC and AC Responses of Josephson Vortex Flow Transistors with High T_c Superconducting Thin Films"
IEICE Transactions on Electronics **E89-C** (2), 177-181 (2006).
 - R. Inoue, Y. Odate, E. Tanabe, H. Kitano and A. Maeda
"Data analysis in the evanescent perturbation method using an open-ended coaxial resonator probe"
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **54** (2) 522-532 (2006).
 - H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda and I. Tsukada
"Critical fluctuations across the phase diagram of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ probed by dynamical microwave conductivity"
Physical Review B **73** (9) 092504-1 – 092504-4 (2006).
 - Y. Asano, Y. Tanaka and S. Kashiwaya
“Anomalous Josephson effect in p-wave dirty junctions”
Physical Review Letters **96** (9), 097007_1-4 (2006).
 - I. Kawayama, T. Miyadera, T. Kiwa, K. Tsukada and M. Tonouchi
"A Tunable Sub-Terahertz Wave Generation and Detection System with a Photomixer and a High- T_c Josephson Junction"
Superconductor Science and Technology **19** (5), S403-S406 (2006).

(2) 特許出願

H17 年度出願件数：0 件（CREST 研究期間累積件数：2 件）