

「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

本研究では、サブ THz で動作する集積回路を目指し、室温エレクトロニクスとのインターフェイスも含め高温超伝導体 (HTS) による単一磁束量子 (SFQ) 回路の基盤技術の構築を目的としている。この目的達成のために、高品質積層型ジョセフソン接合の作製と光とのインターフェイスについてチーム全体で研究を推進している。基本となるジョセフソン接合については、新しく表面波プラズマによるトンネル障壁層形成プロセスを提案・導入し、従来よりも優れた特性を得るに至った。特性改善の要因の解析とともに、この技術をもとにサブテラヘルツからテラヘルツ領域での動作検証を進める。

一方、光入力に関しては、半導体フォトダイオード(PD)を用いる方法と直接入射の 2 通りについて研究を進めた。PD を用いた方法に関してはフォトミキシングを用いて Nb による SFQ 回路に対し SFQ 信号を発生・供給することに成功したほか、高温超伝導 SFQ 回路に対しても低速で SFQ の生成に成功した。また、直接入射法においても、1 個には絞られていないものの SFQ の生成に成功している。今後、条件を最適化することで、HTS-SFQ 回路において SFQ 1 個の生成・伝搬を高周波で実現できるものと考えている。光出力に関しては低速かつ複数の SFQ による動作ではあるが、磁気光学効果によって SFQ/光変換が世界で初めて観測された。

また、酸化物障壁層の作成を必要としない簡便なジョセフソン接合の作製法を提案し、その基礎特性を得た。今後、十分なデータの取得とともにその動作原理の完全な解明を目指す。一方、銅酸化物超伝導体における輸送現象を解析しその背後にある物理現象を解明するために、種々のジョセフソン接合に対する理論的研究、とりわけ近接効果に期待される共鳴状態の効果を取り入れた接合系における輸送現象について解析し、酸化物超伝導接合作成に対する指針を与えた。

2. 研究実施内容

本研究は、「光とのインターフェイスを含めたテラヘルツ動作の単一磁束量子 (SFQ) 回路の基盤技術の確立」を柱として 3 つの大きな研究項目からなる。H18 年度の計画書に記載した通り、H17 年度に研究の進め方の見直しを行い、「基礎も含めた高温超伝導体ジョセ

フソン接合技術の確立と展開」及び「光/SFQ インターフェイス技術の研究の加速」という観点を重点化した。以下に研究項目毎に H19 年度における研究の進め方を示す。

○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、HTS ジョセフソン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ほか、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ことが目標のひとつとなっている。

これまでのチーム全体の研究結果から、特性劣化／ばらつきの要因は、超伝導電極とトンネル障壁界面に超伝導劣化層が形成され、その劣化層及びトンネル障壁層の厚さや特性がばらついていることであることが分かった。我々は、トンネル障壁形成時のプラズマエネルギーの広がりや上記要因と深く関連していると考え、プラズマエネルギー分布のより小さな表面波プラズマによって積層構造ジョセフソン接合の開発を行った。その結果、同じ臨界電流密度では従来よりもやや高い $I_c R_n$ 積を持ったジョセフソン接合を形成することに成功した。これは、さらなる高品質化にも期待を持たせる結果である。

本グループは、光入力用回路の作製や光出力用ナノブリッジの作製も任務としている。実際に光とのインターフェイスに係わる実験結果については、光インターフェイスグループの結果として記載する。ここでは、光出力用ナノブリッジの形成について報告する。ナノブリッジに要求される極微細加工を行うために、超伝導薄膜端部での特性劣化の低減を考慮したエッチング技術の検討を行った。電子ビーム露光時のボックスキャッチ防止層として Cr を導入するなど、加工時に幾つかの工夫をすることで、ブリッジ幅 100nm までのナノブリッジの作製に成功した。SQUID 構造を形成することで、磁束量子が 1 個単位でループに出入りしていることを示す変調パターンを得た。より高い出力電圧が得られれば、計画通りの結果に繋がると考えている。

○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

我々は光入力インターフェイスとして、高温超伝導 SFQ 回路と半導体 PD を組み合わせたハイブリッドタイプと、超伝導薄膜のみで構成されたジョセフソン磁束フロートランジスタ(JVFT)タイプの両者を並行して開発してきた。

ハイブリッドタイプでは、HTS 接合グループと協力しフェムト秒光パルスをも PD により電流パルスへと変換し、この電流パルスをジョセフソン伝送線(JTL)へと入力した。JTL からの出力信号は最終的に同じチップ上に作製した SQUID によって検出する。この実験により、光入力による SFQ 回路中の磁束の生成が確認された。

次に、JVFT 型光入力素子を作製し、フェムト秒レーザーパルスを入力した結果について述べる。この JVFT のジョセフソン接合部にレーザーパルスを照射し出力電圧を測定した。その結果、レーザーの変調に同期した出力電圧の変調が観測された。これは、レーザーの照射により、JVFT に磁束量子が誘起、それがフロー状態になりフロー電圧が発生したことを意味している。

(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

H18年度は実際に超伝導デバイス中の磁束分布をレーザーMOシステムを用いて観測し、さらに超伝導デバイス中の局所磁界の動的な振る舞いの計測に成功した。JVFTをYBCO薄膜を用い作製し、制御電流線に振幅200mA周波数1kHzの方形波電流を流した。図1はレーザーを照射し、内部の磁界の変化をMO検出により計測した結果である(黒線が測定データ、赤線が30点平均)。

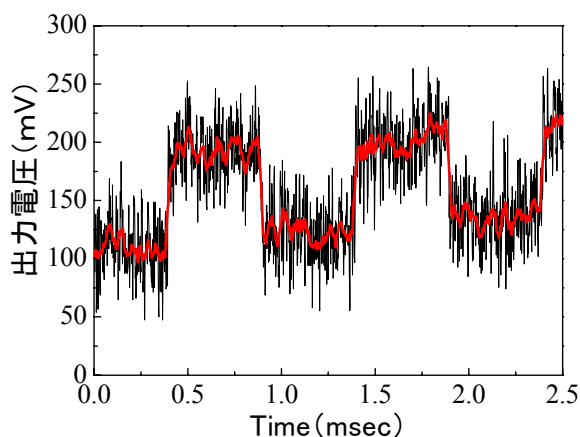


図1 MO検出器の出力電圧の時間変化

1kHzで変動する磁界が明瞭に観測されており、振幅の大きさから検出した磁束は磁束量子数個分と見積もられる。これは単一磁束量子の高速検出にむけて大きな進歩となる。

○SFQ基礎グループ

(1) ランプエッジ接合特性のキャリア濃度依存性の研究

HTS接合グループと協力して、最適ドーピング、過剰ドーピングの試料でジョセフソン接合を作成し、電流-電圧特性の評価を行った。その結果、ジョセフソン電流と準粒子ギャップの両方が観測されるような接合を過剰ドーピングの試料に対して作成することに成功した。

(2) 磁性体堆積型ジョセフソン接合の作製

高温超伝導体ストリップ上に磁性金属である鉄を蒸着することにより、新しい構造の弱結合の構成を目指した。磁場応答、マイクロ波応答などから、ジョセフソン接合的な振舞いが観測された。再現性を得るプロセスをほぼ確立したため、今後、各種接合パラメータを評価する計画である。

(3) 奇周波数超伝導状態と近接効果に関する理論的アプローチ

通常超伝導体の電子対の対称性はスピン1重項偶パリティ(s波d波など)とスピン3重項奇パリティ(p波f波など)に分類されることが知られている。しかし同時に奇関数となる電子対も存在しえる。本研究では一般的な条件で奇周波数電子対が存在することを示した。さらに超伝導近接効果の対称性に関する一般論を提案して、拡散伝導領域に誘起される電子対の対称性の分類を行った。その結果、スピン3重項超伝導体の電子対が拡散伝導領域に侵入する際には、奇周波数状態になるという性質を解明した。また、接合界面などで超伝導秩序変数が変化することにより、偶周波数状態と奇周波数状態は混じりあうことを明らかにした。このことはよく知られているスピン1重項s波(BCS)超伝導状態においても、界面や磁束などの不均一状態において、必ず奇周波数状態が混ざることを意味している。

また、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い

て計算を行った。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。

3. 研究実施体制

(1) HTS 接合グループ

① 研究者名

藤巻 朗 (名古屋大学 教授)

② 研究項目

- ・ 高温超伝導積層型ジョセフソン接合の高品質化・高機能化
- ・ 光/SFQ インターフェイス基盤技術開発

(2) 光インターフェイスグループ

① 研究者名

斗内 政吉 (大阪大学 教授)

② 研究項目

- ・ 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
- ・ 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

(3) SFQ 基礎グループ

① 研究者名

前田 京剛 (東京大学 助教授)

② 研究項目

- ・ キャリヤ濃度を変化させた一連の薄膜試料および接合作製・評価 (藤巻 G と共同)
- ・ 薄膜試料の超伝導特性の評価, 特に高周波伝導度など
- ・ 新しい簡便法による接合作製
- ・ 高温超伝導体を含む異方的超伝導体のジョセフソン効果の理論的研究

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

○ T. Yokoyama and Y. Tanaka

"Spin-Polarized proximity effect in superconducting junctions"

Comptes Rendus Physique 7 (1), 136-147 (2006).

○ R. Inoue, Y. Odate, E. Tanabe, H. Kitano and A. Maeda

"Data-analysis of the extraction of dielectric properties from insulating substrates utilizing the evanescent perturbation method"

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 54 (2), 522-532 (2006).

- H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda and I. Tsukada
 "Critical microwave-conductivity fluctuations across the phase diagram of superconducting $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films"
 Physical Review B **73** (9), 092504-1 - 4 (2006).
- T. Yokoyama, Y. Tanaka and A. A. Golubov
 "Resonant proximity effect in normal metal / diffusive ferromagnet / superconductor junctions"
 Physical Review B **73** (9), 094501-1 - 10 (2006).
- T. Yokoyama, Y. Tanaka, A. A. Golubov and Y. Asano
 "Nonmonotonic temperature dependence of critical current in diffusive d-wave junctions"
 Physical Review B **73** (14), 140504-1 - 4 (2006).
- T. Ohashi, H. Kitano, A. Maeda, H. Akaike and A. Fujimaki
 "Dynamical fluctuations in the superconductivity of NbN films from microwave conductivity measurements"
 Physical Review B **73** (17), 174522-1 - 8 (2006).
- H. Kitano, K. Ota and A. Maeda
 "Complex microwave conductivity of Na-DNA powders"
 Journal of the Physical Society of Japan **75** (9), 094704-1 -6 (2006).
- A. Maeda, H. Kitano, L. Gomez, T. Kubo, K. Ota and T. Ohashi
 "High- T_c Josephson junction : towards improvement of IcRN product and realization of phase qubits"
 Journal of Physics: Conference Series **43**, 1151-1154 (2006).
- T. Yokoyama, Y. Tanaka and J. Inoue
 "Charge transport in two-dimensional electron gas / insulator / superconductor junctions with Rashba spin-orbit coupling"
 Physical Review B **74** (3), 035318-1 - 7 (2006).
- Y. Asano, Y. Tanaka, T. Yokoyama and S. Kashiwaya
 "Josephson current through superconductor/diffusive-normal-metal/superconductor junctions: Interference effects governed by pairing symmetry"
 Physical Review B **74** (6), 064507-1 - 11 (2006).
- H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda and I. Tsukada
 "Dynamic scaling analyses of AC fluctuation microwave conductivity in superconducting $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films"
 Proceedings of LT24, the AIP Conference Proceedings **850**, 415-416 (2006).
- H. Kitano, K. Ota and A. Maeda
 "Superconducting cavity resonator with a metallic tip for realizing strong coupling between superconducting qubits and microwave photons"

- Proceedings of LT24, the AIP Conference Proceedings **850**, 943-944 (2006).
- H. Murakami, K.Ueno, I.Kawayama and M. Tonouchi
"Development of a prototype laser magneto-optical imaging system"
Superconductor Science and Technology **19** (9), 941-944 (2006).
 - T. Kimura, K. Taniike, T. Inoue, M. Inoue and A. Fujimaki
"Vertically-stacked interface-treated Josephson junctions fabricated by new in situ process"
Physica C **445-448**, 921-924 (2006).
 - K. Ota, H. Kitano and A. Maeda
"Escape rate from the zero-voltage state in the intrinsic Josephson junctions of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ "
Physica C **445-448**, 955-958 (2006).
 - I. Shigeta, Y. Tanaka, F. Ichikawa and Y. Asano
"Smearing origin of zero-bias conductance peak in $\text{Ag-SiO-Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ planar tunnel junctions: influence of diffusive normal metal verified with the circuit theory"
European Physical Journal B, Condensed Matter **54** (2), 141-149 (2006).
 - S. Kawabata, S. Kashiwaya, Y. Asano, Y. Tanaka and A. A. Golubov
"Macroscopic quantum dynamics of π -junction with ferromagnetic insulators"
Physical Review B **74** (18), 180572-1 - 4 (2006).
 - M. Inoue, T. Nishitani, A. Fujimaki, T. Yamada, K. Sawaki, I. Kawayama and M. Tonouchi
"Study on the optical input interface for Nb single-flux-quantum logic circuits"
Applied Physics Letters **89** (25), 252511-1 - 3 (2006).
 - T. Yokoyama, Y. Tanaka and A. A. Golubov
"Angular dependence of Josephson currents in unconventional superconducting junctions"
Physical Review B **75** (2), 020502-1 - 4 (2007).
 - Y. Tanaka and A. A. Golubov
"Theory of the proximity effect in junctions with unconventional superconductors"
Physical Review Letters **98** (3), 037003-1 - 4 (2007).
 - Y. Tanaka, Y. Asano, M. Ichioka and S. Kashiwaya
"Theory of tunneling spectroscopy in the Larkin-Ovchinnikov state"
Physical Review Letters **98** (7), 077001-1 - 4 (2007).
 - I. Kawayama, Y. Doda, R. Kinjo, T. Kiwa, H. Murakami and M. Tonouchi
"Study on Sub-THz Signal Input for Superconducting Electronic Devices"
IEICE Transactions on Electronics **E90-C** (3), pp588-594 (2007).
 - T. Yokoyama, Y. Tanaka and A. A. Golubov
"Theory of the Josephson effect in unconventional superconducting junctions with diffusive barriers"
Physical Review B **75** (9), 094518-1 - 10 (2007).

- Y. Asano, Y. Tanaka and A. A. Golubov
"Josephson effect due to odd-frequency pairs in diffusive half metals"
Physical Review Letters **98** (10), 107002-1 - 4 (2007).
- T. Yokoyama, Y. Tanaka and A. A. Golubov
"Manifestation of the odd-frequency spin-triplet pairing state in diffusive ferromagnet / superconductor junctions"
Physical Review B **75** (13), 134510-1 - 8 (2007).
- Y. Sawa, T. Yokoyama, Y. Tanaka and A. A. Golubov
"Quasiclassical green's function theory of Josephson effect in chiral p-wave superconductor / diffusive normal metal / chiral p-wave superconductor junctions"
Physical Review B **75** (13), 134508-1 - 9 (2007).

(2) 特許出願

平成 18年度特許出願:2 件 (CREST 研究期間累積件数:4 件)