

戦略的創造研究推進事業
ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ
研究領域「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・
システムの創製」
研究課題「単一磁束量子テラヘルツ
エレクトロニクスの創製」

研究終了報告書

研究期間：平成14年11月～平成20年3月

研究代表者： 藤巻 朗
(名古屋大学大学院工学研究科 教授)

1 研究実施の概要

《研究背景・構想》

本研究は、超伝導単一磁束量子回路(SFQ回路)によるテラヘルツエレクトロニクスの基盤確立を目指し、そこで用いる高温超伝導デバイスのポテンシャルの高さを実証することを目途として研究提案に至った。もともと高温超伝導体は 90K 近い臨界温度を有しており、原理的には現在の Nb-SFQ 回路よりも 10 倍の高速性が見込まれる。高速性の指標となる $I_c R_n$ 積(I_c は接合の臨界電流値、 R_n 積は接合の常伝導抵抗)も Nb ジョセフソン接合の 10 倍の約 20mV となることが期待されたが、実際に作製された $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)を用いた接合では、その 1/10-1/5 程度にとどまっていた。我々は、この低下の原因が超伝導/トンネル障壁(S/I)界面の問題、あるいはトンネル障壁自身の不完全性の問題ととらえた。回路応用には、接合特性のばらつきの低減化や再現性の向上などが必須であるが、それらの原因も多くは界面、もしくはトンネル障壁自身の問題へ帰結すると考えた。

一方、世界的には高温超伝導ジョセフソン接合の研究は、図 1(a)に示すようなランプエッジ構造が主流であった。作製が容易である上、酸化物超伝導体において超伝導を担う CuO_2 面に垂直に接合面を形成することで、高い $I_c R_n$ 積が得られると期待されたためである。しかしながら、ランプエッジ構造は寄生インダクタンスが大きく、それが回路応用に際し動作速度と動作マージンの低下を導くことを危惧された。実際、当時の 1/2 分周回路では Nb-SFQ 回路の 1/7 程度の周波数でしか、動作が確認されなかった。また、ランプエッジ構造は接合配置の自由度が低く、回路設計の上で大きな支障をきたすことも明らかであった。

以上を踏まえ、我々は本研究以前より、図 1(b)に示すような積層構造ジョセフソン接合の開発に取り組んでいた。接合形成は、我々が提案してきた表面改質法をもとに、 PrGaO_3 (PGO)をトンネル障壁層に添加する手法を取り入れていた。これにより、ショートのおきやすい積層構造ジョセフソン接合においても良好なジョセフソン接合を比較的安定に得る技術を世界で唯一獲得していた。このような背景のもと、本研究では、急峻な S/I 界面やより均質性の高いトンネル障壁層を求めて研究を開始した。これが、最終的には本研究の目的である SFQ テラヘルツエレクトロニクスに耐え得るジョセフソン接合に繋がると考えたためである。また、アプローチは単に名古屋大学・藤巻グループが従前の方法で接合開発に取り組むのではなく、接合の基礎物理を理解する必要があると感じ、物理的な側面からの支援を SFQ 基礎班として東京大学・前田グループ(実験)、名古屋大学・田仲グループ(理論)に依頼した。SFQ 基礎班は、接合研究においては、特に $I_c R_n$ 積の低下の原因を探り、それをもとに新しい接合構造を見出すことを 5 年間の課題とした。

仮にテラヘルツ領域で動作する超伝導集積回路が動作したとしても、室温から入力信号は基本的に与えられ、出力も最終的には室温のエレクトロニクスへ渡される。これを考えると、電気信号入力では、帯域が小さすぎ、光による入出力技術の開発が不可欠と考えた。幸い大阪大学・斗内グループが、世界的にいち早く超伝導フォトンクスという研究分野を立ち上げようとしており、その一部の研究が、光/SFQ 変換、SFQ/光変換へ適用可能であることが分かった。これを受け、光インターフェイスグループを設け、そこで HTS 接合グループ(藤巻ら)とともに、高周波での光入力回路開発、および光出力基礎回路の開発に着手した。光出力に関しては、磁気光学効果を利用する手法を提案した。その実現のためには、 $1\mu\text{m}$ 角程度の小さい面積内に、接合のような超伝導弱結合

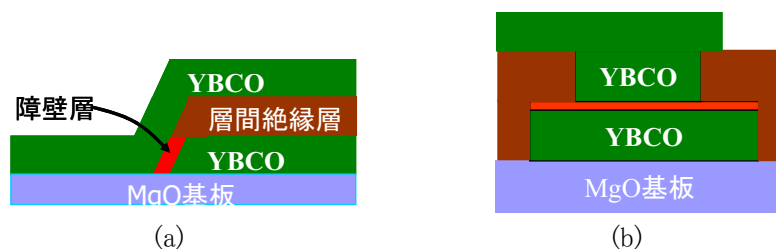


図 1 (a)ランプエッジ構造ジョセフソン接合の断面図、(b)積層構造ジョセフソン接合の断面図

素子も含めた超伝導ループを形成する必要がある。この目的のため、弱結合素子としてナノブリッ

ジを採用した。ナノブリッジは線幅 300nm 程度以下の細線で、名古屋大学グループで開発の実績がある。本研究では近畿大学・楠グループとともに、その細線線幅をさらに細くすることで、高速性の向上と光出力の実証を目標とした。なお、田仲グループは2年目から、楠グループは3年目からの加入である。ともに研究遂行の強化を目的として、チームに加わった。

《研究経緯・研究成果》

本研究の内容は、高温超伝導ジョセフソン接合の開発と光インターフェイスの開発に大別される。前者は、HTS 接合グループと SFQ 基礎グループが担い、後者は光インターフェイスグループと HTS 接合グループが共同で研究を進めた。以下、上記2つの項目に分けて説明する。

・ 高温超伝導ジョセフソン接合の開発

高温超伝導積層構造ジョセフソン接合の開発に向けて、良好なトンネル障壁層の形成と急峻な S/I 界面の形成を試みた。良好なトンネル障壁には、均質性・均一性とともに入在する欠陥が少ないことが求められる。また急峻な界面形成には、トンネル障壁前駆体となるプラズマによる損傷層の厚さの厳格な制御が必要と考えられる。さらに、S/I 界面に存在すると考えられる歪などを伴った中間層の影響を小さくすることも求められる。

そこで、まず理論的なアプローチによって、臨界電流の温度依存性と $I_c R_n$ 積の低下の説明を試みた。その結果、S/I 界面に常伝導拡散層を設けたモデルが、実験的に得られた特性とよく一致することが明らかとなった。常伝導拡散層の存在は、このほかにも実際に電流-電圧特性で見られるように、超伝導トンネル接合特有のギャップ構造を消失させる効果も持つと考えられる。我々は、常伝導拡散層は酸素欠損や元素のわずかな置換によってキャリアが不足し超伝導になりきれていない部分と解釈した。この仮説が正しければ、電極のキャリア密度を変化させれば、特性が大きく変化することが予測される。そこで、下部超伝導電極材料としてキャリア密度を変化させられる $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_3$ (LSCO) を用い、ランプエッジ構造ジョセフソン接合を作製し、その特性を評価した。この研究に先立ち LSCO の交流伝導度を測定することによって超伝導ゆらぎを計測し、電子相図を得た。この実験データも参考に接合を作製・評価した結果、キャリアを最適値(最高の臨界温度を示す値)よりも過剰にした接合において、人工的に形成したトンネル障壁を持つ HTS ジョセフソン接合としては初めて、僅かではあるが超伝導電流とギャップ構造が同時に観測された。この結果は、高い $I_c R_n$ 積を得るための大きな指針となるとともに、急峻な S/I 界面の形成の重要性を改めて示唆している。

以上の結果を踏まえ、トンネル障壁層の形成メカニズムの検討を行った。現在我々が行っているジョセフソン接合作成法では、下部電極表面がプラズマで損傷を与えられ(相乗となるこの部分を損傷層、アモルファス層、もしくはトンネル障壁前駆体と呼ぶ)、その後そこが上部電極成膜を含めたの熱処理時に再結晶化し、トンネル障壁へと変化する。プラズマの種類や損傷層の組成比、AFM、TEM、EDX による解析の結果、トンネル障壁は YBCO の構成元素の一部が Yb や Pr などの元素で置換

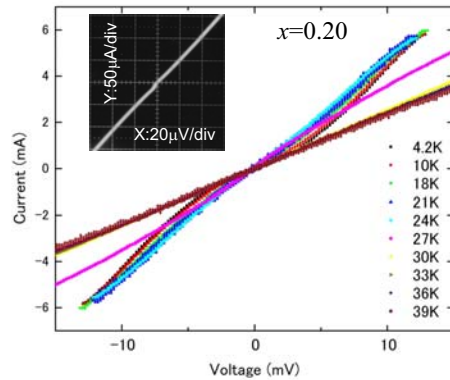


図2 YBCO/LSCO 接合の I - V 特性. 超伝導電流とギャップ構造が初めて観測された。

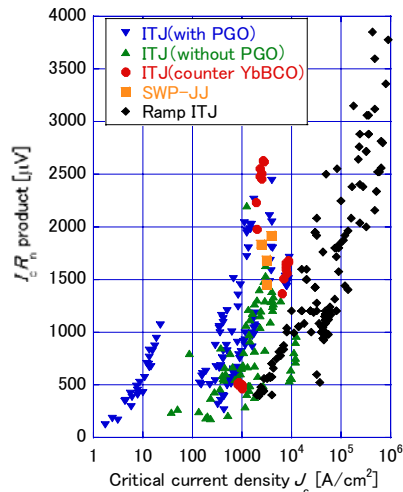


図3 各種接合の $I_c R_n$ 積と臨界電流密度の関係. 低い臨界電流密度で高い $I_c R_n$ 積が得られることが望ましい. ●▼■が本研究の成果。

することによって絶縁体化していることが分かった。置換が効率良く起こると、損傷層での Y_2O_3 などの凝集が抑制され、結果として均一なトンネル障壁が形成される。また、損傷層の形成にはエネルギーの均一なプラズマが適しており、角度を浅く設定することで、比較的急峻な S/I 界面と均質なトンネル障壁が得られることが分かった。図 3 は、本研究の成果である積層構造ジョセフソン接合 (●) とランプエッジ構造のジョセフソン接合 (◆) の $I_c R_n$ 積について比較した結果である。積層構造では、同じ臨界電流密度では、ランプエッジ接合よりはるかに高い $I_c R_n$ 積が得られていることが分かる。また、ばらつきについても、ランプエッジ接合と同程度まで低減化することに成功した。さらにこの技術を用いて、1/2 周波数分周回路 (Toggle Flip-flop) を試作した結果、500GHz までの動作を確認した。この結果は、高温超伝導体としては世界最高の値であり、回路として Nb-SFQ 回路を上回る初めての結果と言える。

ナノブリッジに関しては、現在 50nm 幅まで縮小化に成功している。この線幅は、これまで報告された中ではもっとも細い線幅である。磁束量子 1 個ずつを通す機能を有することは確認したが、高速性に関しては以前の値を更新するには至らなかった。原因の詳細は不明であるが、何らかの損傷がブリッジに入ったと考えている。なお、この微細加工技術は、検出器として話題を集めるに至った超伝導ナノワイヤを形成する技術への展開が可能である。

・ 光インターフェイスの開発

光入力インターフェイスの開発は、フォトダイオード (PD) など一度電気信号に変換したのち、SFQ 信号に再変換する手法と、直接光を超伝導デバイスに照射し、SFQ 信号を発生する手法の 2 種類がある。本研究では、まず前者の手法に取り組んだ。波長の僅かに異なるレーザー光をミキシングさせることでビートとなる電気信号を PD で発生、最高 5.5GHz までの光信号を SFQ に変換することに成功した。周波数は、PD と SFQ 回路間のケーブルの帯域による制限であり、原理的にはより高い数十 GHz、UTC-PD を用いれば 100GHz も可能と考えている。しかしながら、この手法では、発熱が SFQ 回路の動作に影響を及ぼす恐れがあることが分かった。そこで、研究の後半では、光を直接超伝導デバイスに照射する方法を試みた。図 4 は、高温超伝導平面型ジョセフソン接合 (バイクリスタル接合) による回路に光を照射し、発生する電圧波形をダブルパルス法によって測定したものである。図から明らかなように、約 5ps のパルス幅を持つインパルス状の電圧が発生しており、単一の磁束量子を発生するのに最も適した形となっている。また、100GHz 程度までは問題なく応答することも確かめられ、入力インターフェイス技術はほぼ整ったと考えられる。なお、ジョセフソン接合において光照射による電圧発生波形を観測した例はなく、これが最初の観測となる。

光出力は、超伝導ループに捕らえられた磁束量子を、磁気光学効果を用いて検出する原理である。このため、磁気光学顕微鏡を構築し、静止した磁束を観察することから研究が始められた。現在は、静止した磁束はもとより、図 5 のように磁場の時間変化を観測するに至った。光検出器の帯域幅の関係で、周波数は 1kHz 程度にとどまっているが、今後はより感度の高い光検出器を用いることで、数十 GHz 程度まで SFQ/光変換が可能になるものとする。

以上のように、本研究は当初の目標をほぼ達成しており、単一磁束量子テラヘルツエレクトロニクスの構築に寄与したものと考えている。

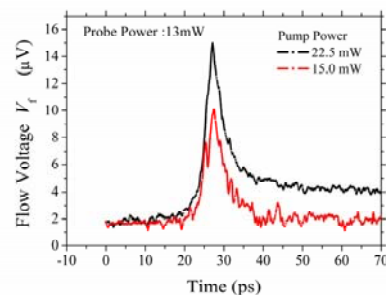


図 4 高温超伝導ジョセフソン接合の光照射応答。

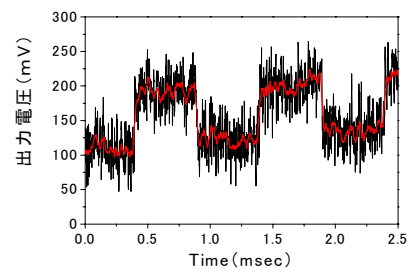


図 5 SFQ/光変換回路の出力波形例。動作周波数は 1kHz。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

次項「3. 研究実施内容及び成果」において、研究項目、研究目標、達成状況について表としてまとめるので、ここでは研究項目と研究目標について簡潔に記す。

・HTS 接合グループ

本研究グループは、高温超伝導積層型ジョセフソン接合の開発を手掛け、テラヘルツ領域で動作するような高性能化と集積化に耐え得るばらつきの低減化などを担当する。また、光インターフェイスグループとともに、光入力回路を、ジョセフソン接合を用いて構築するほか、SFQ 基礎グループとともに接合のデバイス物理解明のための試料を作製する。さらに、光出力インターフェイス用のナノブリッジの作製も担当する。

[研究項目]

* HTS 積層接合の開発

- ・開発目標：ジョセフソン接合の特性ばらつき原因を特定し、高品質積層接合作製技術を開発する。

実施期間：研究期間全体

- ・追加研究目標：周波数分周器による高速性の実証

実施期間：2007 年度

* ナノブリッジの作製と評価

- ・開発目標：ナノブリッジの作製と単一磁束量子による高速動作の検証

実施期間：2004 年度以降

- ・追加研究目標：ナノブリッジの光応答計測

実施期間：2007 年度

* Nb 回路用入出力（当初計画にはない研究項目）

- ・開発目標：フォトミキシング技術を利用した高周波光入力の実証および二重積層ジョセフソン接合による出力電圧の高電圧化

実施期間：2004 年度以降

・光インターフェイスグループ

本研究グループは、高温超伝導体、とりわけジョセフソン接合と 100GHz を超える電磁波、あるいは光との相互作用を研究し、SFQ テラヘルツエレクトロニクスで必要となる1チャンネル当たり 100Gbps を超える光/SFQ 変換技術、および数十 GHz 以上の SFQ/光変換技術の基礎を確立することを目標とする。試料については、HTS 接合グループと協力して開発する。

[研究項目]

*光ミキシング磁束量子発生ゲートの開発と SFQ 光入力インターフェイスの構築

- ・開発目標：フォトミキシングを用いたサブテラヘルツ光入力システムの開発、およびフェムト秒パルスを用いた単一磁束量子の発生と制御

実施期間：研究期間全体

*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

- ・開発目標：磁気光学効果を用いた単一磁束量子の静的・動的観察、および光出力インターフェイスに向けた基盤技術の開発。

実施期間：研究期間全体

・SFQ 基礎グループ

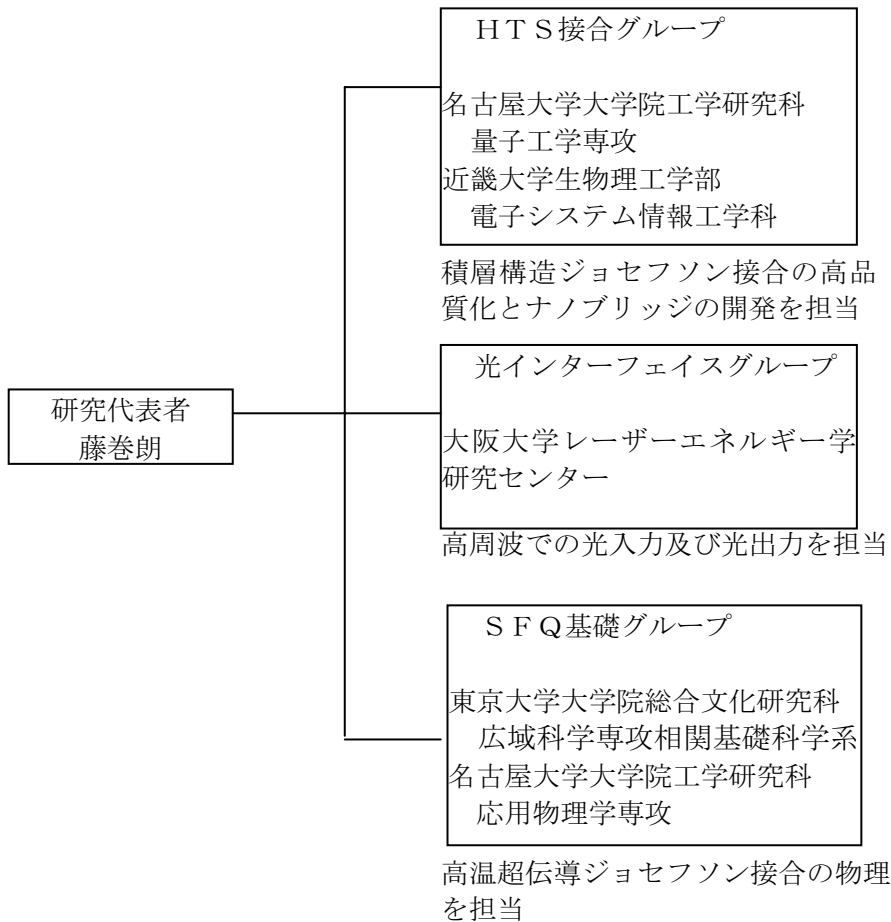
本研究グループは、高温超伝導ジョセフソン接合のデバイス物理を実験・理論の両面から解析することで、より性能の高いジョセフソン接合を得るための指針を獲得することを目標としている。試料は HTS 接合グループと協力して作製した。

[研究項目]

*高温超伝導体接合の伝導特性解析

- ・ 開発目標：高温超伝導体ジョセフソン接合の小さな $I_c R_n$ 積の原因を特定し、大きな $I_c R_n$ 積を持つ接合作製に向けての提言を行う。
 - 実施期間：研究期間全体
 - ・ 追加研究目標：交流伝導度測定による超伝導ゆらぎの研究
 - 実施期間：2003 年度以降
- * ナノブリッジ内ボルテックスの挙動解析
 - ・ 開発目標：ナノブリッジの作製と磁束量子のダイナミクスの研究を行い、高速動作にむけての提言を行う。
 - 実施期間：研究期間全体
 - ・ 追加研究目標：ブリッジタイプのジョセフソン接合の作製と特性評価
 - 実施期間：2005 年度以降
- * 固有ジョセフソン接合の特性解析（当初計画にはない研究項目）
 - ・ 開発目標：銅酸化物超伝導体固有接合を作成し、特性評価を行う。特に高温動作量子ビットを実現させる。
 - 実施期間：2004 年度以降

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 HTS 接合グループ(名古屋大学、近畿大学 藤巻グループ)

中間報告書で記載したとおり、本研究グループでは当初計画にあった 2 つの実施項目(「集積化に適した高温超伝導積層ジョセフソン接合の開発」、「各種接合およびナノブリッジの作製と評価」)に加え、新たに 3 つ目に実施項目「Nb 回路用入出力」を設け研究にあたった。まず、申請時に設定した目標と達成状況、その他特記事項として全体をまとめる。その後、実施項目ごとに、研究実施内容及び成果を記載する。

グループ全体の総括

項目	開発目標	達成状況	達成度自己評価(5段階)
HTS 積層接合の開発	ジョセフソン接合の特性ばらつき原因を特定し、高品質積層接合作製技術を開発する。	トンネル障壁層の形成機構をさまざまな角度から検討。積層構造としては世界最高の水準の品質のジョセフソン接合の作製に成功。ばらつきも研究の主流のランプエッジ構造とほぼ同じレベルにまで低減化でき、小規模集積回路の実現が可能となった。実際に、1/2 分周回路を試作し高温超伝導体としては世界最高周波数の約 500GHz での動作を実証し、積層構造の優位性を検証。	5
ナノブリッジの作製と評価	ナノブリッジの作製と単一磁束量子による高速動作の検証	電子ビーム露光により世界最小線幅の 50nm までの細線化に成功。単一磁束による動作は確認。	3
Nb 回路用入出力	フォトミキシング技術を利用した高周波光入力の実証および二重積層ジョセフソン接合による出力電圧の高電圧化	PD を用いたフォトミキシング技術を利用して、5GHz での単一磁束量子回路への入力に成功。また、積層接合の特長を活かした二重接合の作製にも成功。	5
その他特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・21 世紀 COE プログラム「先端プラズマ科学が拓くナノ情報デバイス」との連携により、プラズマパラメータと薄膜特性、あるいは接合特性との相関を解明。 ・計 4 回(予定1回を含む)の領域横断企画により、検出器への応用への展開の手がかりを掴む。 		

(1)研究実施内容及び成果

上表の項目にしたがって、具体的な実施内容・成果等を記す。ただし、他のグループと協力して実施した研究内容、具体的には SFQ 基礎グループに対する試料提供および光インターフェイスグループへの測定用回路の一部提供については、それぞれのグループでの報告として記載する。ただし、独立に実施した研究内容については、本欄へ記載する。

(1-1) HTS 積層接合の開発

すでに述べたように、本研究では高温超伝導体を用いて、集積化に有利な積層構造ジョセフソン接合をさまざまな角度から研究し、最終的にサブテラヘルツで動作する集積回路に耐えられるレベルにまで、特性を向上させることを目標としている。申請時には、その目標へ向けての具体的な方法として、電極の元素置換やトンネル障壁層前駆体への元素添加を掲げた。実際には、それにとどまらず着手し得る方法はすべて行うという気概で積層構造ジョセフソン接合の研究に取り組んだ。したがって他のプロジェクト、とりわけ名古屋大学電気系教室が主体となって運営した 21 世紀 COE プログラム「先端プラズマ科学が拓くナノ情報デバイス」(代表・菅井秀郎、平成 14 年度～18 年度)においてプラズマ研究の専門家と共同で実施した内容も本報告に一部盛り込む。なお、同プログラムの経費で購入したスパッタ装置およびプラズマ計測装置(LIF)を借用した以外は、資金的な支援はなかったことを付記しておく。単独の積層構造ジョセフソン接合に関して研究を実施した項目を、図 6 に示した。このほかに、回路化の基礎として分周回路の実証を行っている。また、図7には、積層構造ジョセフソン接合の作製プロセスの概略を示した。図 6 とともに実施内容の理解の参考にしていただきたい。以下、それぞれの項目について、実施方法・実施内容、成果とその位置づけ、類似研究との比較について整理する。

(a)元素置換による下部電極の平坦性の向上(2002-2003 年に実施)

[実施方法・実施内容]

積層構造ジョセフソン接合の特性ばらつきの低減化、再現性・制御性の向上にはトンネル障壁層形成の母材となる下部電極の表面形態や膜質が重要となる。本研究では高温超伝導体としてもっとも多く研究されている $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)を超伝導電極材料として採用しているが、この薄膜は 3 次元的に成長することが知られている。本研究ではトンネル障壁層を、下部電極表面をプラズマによって改質することによって形成するため、下部電極表面に凹凸があると、特性のばらつきの増加が懸念されるほか、場合によってはショートなどを招くと考えた。そこで、3 次元成長を抑えるために、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の Y サイトと Ba サイトの両方に置換し得る La を下部電極に添加することを試みた。 $\text{LaBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ は YBCO と同様に臨界温度 90K の超伝導体であるが、La の質量が大きいことから YBCO と同じ成膜温度では基板上でのマイグレーションエネルギーが不足する。すなわち YBCO 成膜時にわずかに La を導入すると、その La は、もっとも安定な Y サイトではなく準安定な Ba サイトに入りやすくなる。結果として 3 次元成長は抑えられる。

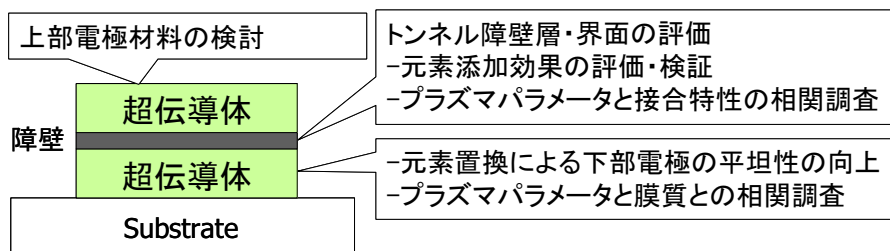


図6 高温超伝導体積層構造ジョセフソン接合の開発に関する研究実施課題

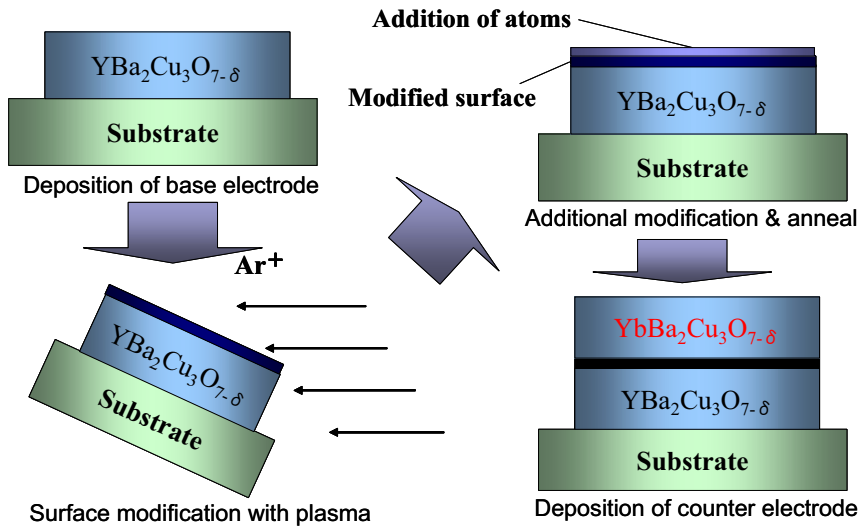


図7 本研究における積層構造ジョセフソン接合の基本的な作製プロセス。各研究項目に応じ、プロセスには変更が加えられている。

具体的な実験としては、下部電極のスputタ堆積に用いるターゲットを $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ から $\text{La}_{x+y}\text{Y}_{1-x}\text{Ba}_{2-y}\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (La-YBCO) に変更して成膜した。La の添加量は、Y の 5-10% 程度である。図 8 に YBCO 薄膜と La-YBCO 薄膜について、平均表面粗さ R_a と RRR の相関を調べた結果を示す。ここで、RRR は残留抵抗(臨界温度直上での抵抗値)に対する 300K での抵抗値の比で大きいほど金属的で良い薄膜とされる。図から明らかなように、La を導入することによって、RRR の大きな劣化なく R_a が約 2/5 の 2nm 程度にまで減少していることが確認された。

[成果の位置づけ、類似研究との比較]

この研究は、もともと超伝導線材の臨界電流向上のため、アブリコソフボルテックス(磁束量子)の運動を阻害する人工的なピンニングセンターの導入に関する研究から発したものと理解している。その結果を見て、超電導工学研究所のグループがレーザー蒸着法による成膜で平坦化を確認している。また、同グループではランプエッジ構造のジョセフソン接合において再現性の向上を確認している。これに対し、本研究のオリジナリティは、RF スputタ法で行ったところにある。しかしながら、この薄膜を下部電極に用いたジョセフソン接合の特性やばらつき等に明確な特性改善が認められなかった。想像の域を出ないが、本研究ではもともとトンネル障壁層への元素添加を進めており、これがすでに、La-YBCO によるランプエッジ接合の特性改善効果と同等な効果を与えている可能性が高い。その根拠は(c)の項目で述べる。

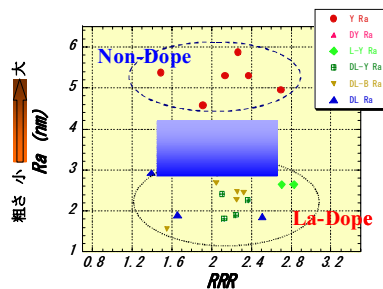


図 8 薄膜の平均表面粗さ R_a と RRR の関係. La を添加することによって大きく平均粗さが減少している。

(b) プラズマパラメータと膜質との相関調査(2003-2006年に実施)

[実施方法・実施内容]

前述のように本研究では、反応性 RF マグネトロンスパッタ法にて超伝導層(YBCO)および層間絶縁層($\text{PrGaO}_3\text{:PGO}$)の堆積を行っている。現在の高温超伝導体では、比較的良質な薄膜が高速に成膜できることから、レーザー蒸着法が多く用いられている。しかしながら、X線回折法などで調べた結果、我々のところでは成膜速度は遅いもののスパッタ法で成膜した薄膜の方が結晶性に優れ、かつ超伝導臨界温度も高かった。このことから、層間絶縁層も含め、現在はすべてスパッタ法で成膜を行っている。

本研究の目的は、冒頭の表の中でも示した通り、積層構造ジョセフソン接合の特性ばらつきへの低減化および高品質化である。これには制御性・再現性の向上も含まれる。こういった観点、とりわけ再現性を確保するという観点から、プラズマパラメータと超伝導薄膜の特性の相関を取ることは重要である。しかしながら、プラズマパラメータの取得には、専用の装置および超伝導とプラズマの両方の専門的な知識が必要なため、これまで相関を取ろうという試みはほとんどなされてこなかった。幸い、本研究と時を同じくして名古屋大学電気系教室が21世紀COEプログラムに採択され、研究費の配分はほとんどないものの、その中でプラズマの専門家複数名と共同で研究をするチャンスを得た。(ここに示す成果は、21世紀COE終了後のデータも含まれるため、21世紀COEには帰属しないと考えている。ただし、論文等については、プラズマ研究者との連名となる。)図9が、プラズマパラメータの計測のための装置の概観図である。2光子吸収LIF(Laser-Induced Fluorescence)によって、Y原子、Ba原子、Cu原子、YO分子、BaO分子、CuO分子の量の2次元測定を実施したほか、酸素原子についてはターゲット中心から法線上の向きに1次元測定を試みた。YBCOの成膜条件は、RF電力を70W、基板温度を670°Cに固定し、酸素とArの流量比や全圧などを変化させながら、膜質との相関を取った。膜質については、XRD、EPMAによって結晶性や組成分析を、原子間力顕微鏡、触針式段差計によって表面観察を、また超伝導性について抵抗-温度特性を調査した。

図10が、酸素流量比を50%に固定とした時の各原子・分子の量の全圧依存性を示したものである。測定点は、試料が置かれる点と同じ、ターゲットから30mmの位置である。Y原子とBa原子は、ターゲット直上ではほぼ完全に酸化されてしまい、基板位置には到達しないため、このグラフから排除している。また、逆にCuO分子も観測されない。Cuは高酸素ガス圧環境下でも酸化されにくく、原子状のまま基板位置へたどり着いている。一方、酸素原子はこの図には記載していないが、500mTorr程度までは全圧に比例して増加し、それ以上では飽和傾向を示すことが分かった。酸素原子の量は、ターゲットからの放出分も含めると、他の原子、分子に比べると圧倒的に多い状況となっている。図11は図10と同じ条件下で成膜したYBCO薄膜の臨界温度を示したものである。全圧が400mTorr以下の場合には超伝導性を示さないが、この領域では酸素イオンが薄膜に衝突した結果、結晶が崩れアモルファス状になっていることが分かっている。400mTorr以上でのプラズマの組成と得られた薄膜の超伝導性を調べると、基板上でCuを如何に酸化させ、かつ結晶学的な安定点へCuを移動させるかが、良質な薄膜を得るための鍵であることが分かる。酸素分圧の増加に伴うプラズマ中の酸素原子の増加は、Cuを酸化する上では効果的であるが、反面、Cuの運動エネルギーを奪うことになる。その結果、安定なサイトへ移動するのが困難になり、500mTorr以上では逆に臨界温度は減少すると現在は考えている。この装置では現在は、臨界温度は86K程度にとどまっているが、たとえばオゾンを導入し全圧を下げるなどの工夫をすれば、酸化力とCuの運動エネルギーを維持した状態が作り出され、より高い臨界温度が得られる可能性がある。

[成果の位置づけ、類似研究との比較]

YBCO薄膜の成膜については、高温超伝導体の発見直後から数多くの報告がなされている。その中で、負イオン(酸素イオン)の効果、すなわち薄膜表面の結晶を壊す効果については指摘されていた。これを避けるために、スパッタ法ではオフセンターやオフアキシスといった手法が取られている。我々のグループにおいては、全圧をあげることによって負

イオンの運動エネルギーを奪う手法を以前から採っている。多くの研究機関の指摘はここまでで、良質な薄膜を得るためのプラズマパラメータやプロセスパラメータとの相関は示されていなかった。今回、2光子吸収 LIF を導入することで初めて、Cu 原子と酸素原子の量、およびその運動エネルギー（マイグレーションエネルギーを含む）が良質な薄膜成長にとって重要なことが明らかにされた。この結果は、地味ではあるが、意義の大きいものと考えている。今後のジョセフソン接合の高品質化の一助となると信じている。

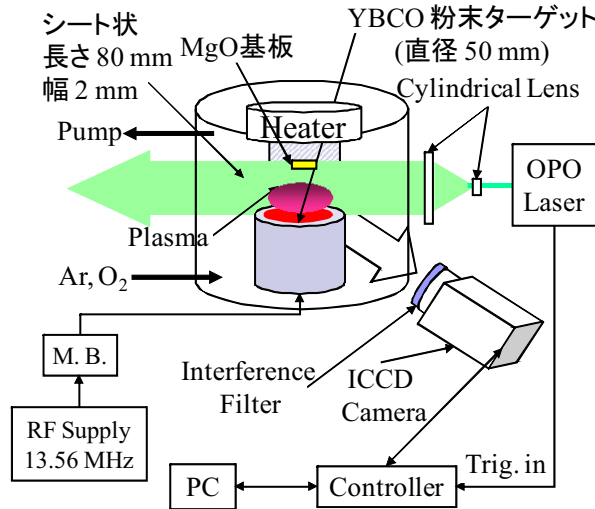


図 9 2光子吸収 LIF を備えた YBCO 成膜用 RF マグネトロンスパッタ装置の概観

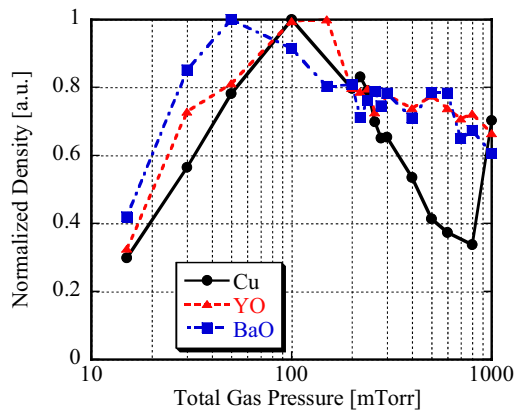


図 10 各種原子、分子の量の全圧依存性

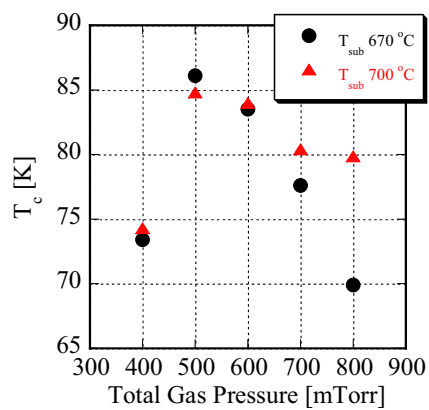


図 11 臨界温度の全圧依存性

(c) トンネル障壁層・界面の評価 (2002 年—2004 年に実施)

(c-1) 元素添加効果の評価・検証

[実施方法・実施内容]

本研究では、他の研究機関では作製できなかった積層型ジョセフソン接合を高品質かつ再現性良く得るために、申請時から表面改質層に元素を添加することを提案してきた。実際に用いた材料は PrGaO₃ (PGO) であるが、これはこの材料の僅かな添加によって、劇的に超伝導ショートが減り、またジョセフソン接合が得られる確率が上がるという実験結果に基づいたものであった。そこで本研究では、透過電子顕微鏡観察、AFM 観察によって、トンネル障壁層近傍で何が起きているかを調べた。

図 12 は、トンネル障壁層の前駆体となる超伝導下部電極表面を AFM によって観察した結果である。図 12(a)は、下部電極を堆積したのち、ECR プラズマによってその表面を改質した状態を観察した結果である。Peak-to-valley(P-V)値は10nmであった。XPSによる解析の結果、表面の組成は、Y:Ba:Cu=1:1:0.65 程度であった。この組成は、後に述べるように良好なトンネル障壁が形成されるための条件と一致している。この試料をそのままアニールした薄膜の AFM イメージが(b)である。アニールの条件は、上部電極形成時と同じで、酸素と Ar の混合ガス下、約 670°Cである。図から、析出物が発生し、表面の P-V 値も 23nm にまで増加していることが分かる。EPMAによる分析の結果から、析出物は Y_2O_3 と考えられる。一方、(c)は(a)の状態であモルファスの PGO を室温で 1nm 相当堆積したのち、(b)と同様にアニールした直後の AFM イメージである。表面形状は(a)と変化なく、P-V 値も変わっていない。この結果はトンネル障壁層前駆体へ PGO を添加することによって、Y サイトや Ba サイトへの Pr の置換や Cu サイトへの Ga の置換が促進され、その結果 2 次元的なトンネル障壁層が形成されることを示唆している。なお、接合抵抗の電圧依存性やその温度依存性を調べると、PGO の添加によって、トンネル障壁中の局在準位数も減少し、より良好なトンネル障壁が形成され、結果として良好な特性(具体的には、接合の臨界電流値と接合特性の積、すなわち $I_c R_n$ 積としてより高い値。高い周波数まで応答することを意味する。)が得られている。

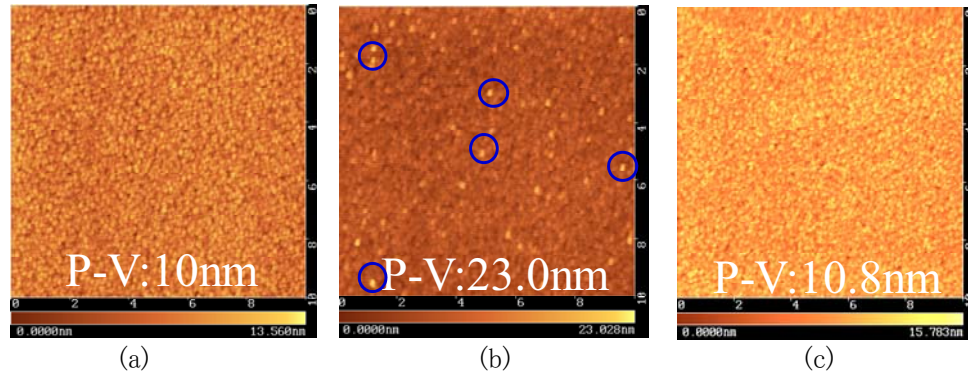


図 12 YBCO 表面の AFM イメージ。(a)YBCO 表面を ECR プラズマにて改質した直後、(b)上部電極成膜に備えたアニール後、(c)表面改質層にあモルファス状の $PrGaO_x$ を 1nm 相当堆積し、その後(b)と同じ条件でアニールしたあとの AFM イメージ。

[成果の位置づけ、類似研究との比較]

すでに述べたように、本成果がこの研究のオリジナリティの根幹をなす部分である。申請時には、僅かな PGO の導入が大きな効果をもたらすメカニズムについてはほとんど分かっていなかったが、(c-2)および(d)で示すプラズマの効果とともに、本研究を通して徐々に明らかとなってきた。具体的な成果の位置づけ、類似研究との比較については次項でまとめて説明する。

(c-2) プラズマパラメータと接合特性の相関調査(2004-2007 年に実施)

(d) 上部電極材料の検討(2005 年-2006 年に実施)

上記2つの項目は、もともと別の目的で実施したものであるが、結果を考察する上では統合的に扱う必要がある。したがって、ここではまとめて記載する。

[実施方法・実施内容]

前述のように PGO のトンネル障壁層前駆体への添加が、アニールによって再結晶化する際に、置換などによってトンネル障壁層へと変化することが分かった。前駆体は XRD、XPS の結果より組成のずれたアモルファス層であることが確認されたので、より精密な制御を目指し、同様な組成を持つアモルファス層を堆積し、それによる積層型ジョセフソン接合の作製を試みた。しかしながら、作製したすべての接合が非線形性の強い高抵抗特性を

示し、超伝導電流は観測されなかった。この結果を受け、トンネル障壁層の形成には、プラズマによる結晶の損傷が不可欠であるとの結論に達し、種々のプラズマ源、あるいはプラズマパラメータと接合特性の相関を調べるにいたった。

比較したのは、通常用いてきた ECR プラズマのほかに、RF マグネトロンプラズマ、表面波プラズマ(SWP)である。それぞれのプラズマを用いて、下部電極の表面に損傷を与え表面改質し、それをトンネル障壁層前駆体としてアニールを経て、接合を作製した。なお、表面改質時の基板温度はすべて室温、またプラズマの効果を確認するため、PGO の添加は行っていない。上部電極材料を変更した実験結果も踏まえると、結局積層型構造にてジョセフソン接合が形成されるには以下のことが必要であることが新たに分かった。

- (i) プラズマ内の粒子のエネルギー均質性(損傷層の均質性)
- (ii) トンネル障壁層前駆体(損傷層)の元素組成
- (iii) イオン入射角度(損傷層の厚さ)

これらは、本研究の主目的である「高温超伝導ジョセフソン接合の高品質化」を達成するための直接的な知見を与えるものである。実際、後述するように、これまでよりも良好な接合特性を得るに至っている。以下、順次得られた成果を報告する。

〈ECR プラズマ表面改質による YbBCO/YBCO 接合〉

YBCO を超伝導電極として用いる表面改質型ジョセフソン接合は、プラズマによって損傷を受けたアモルファス層が前駆体となり、その後のアニールや上部電極成膜時の熱によってトンネル障壁へと再結晶化することを、我々のグループを含むいくつかの研究機関で突き止めた。通常のプロセスでは、アニールと上部電極成膜における基板温度、ガス種、全圧、分圧比は同一の条件で行われる。したがって、前駆体をもっとも高い温度になるのは、プラズマからのエネルギーを受ける上部電極成膜初期段階で、実際この初期プロセスが接合の臨界温度などの特性にもっとも大きな影響を与えることが、ランプエッジ構造のジョセフソン接合によって報告された。プラズマは非平衡状態であるため、均質性や再現性の観点から、トンネル層の形成は平衡状態で行う方が良いと当時は考えられ、上部電極材料に YBCO よりも低い温度で成膜できる $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YbBCO)の適用が提案された。我々のグループでも、この技術を採用したものの、成膜方法が異なったため、結果的には成膜温度を下げることはできなかった。しかしながら、上部電極に YbBCO を用いた積層型ジョセフソン接合は、非常に優れた電流-電圧特性を示し、その解析から数多くの知見を得るにいたった。

図 13 は、ECR プラズマによって表面改質を施しトンネル障壁層を作製した YbBCO/YBCO 接合と YBCO/YBCO 接合の電流-電圧特性である。(a)は YbBCO/YBCO 接合、(b)と(c)は同一チップ上の YBCO/YBCO 接合の例である。YBCO/YBCO 接合に関しては、PGO の障壁層への添加をしていないこともあり、チップ上のばらつきが非常に大きい。これに対し、YbBCO/YBCO 接合は、1 チップ内の 10 個の接合がほぼ同じ特性を示

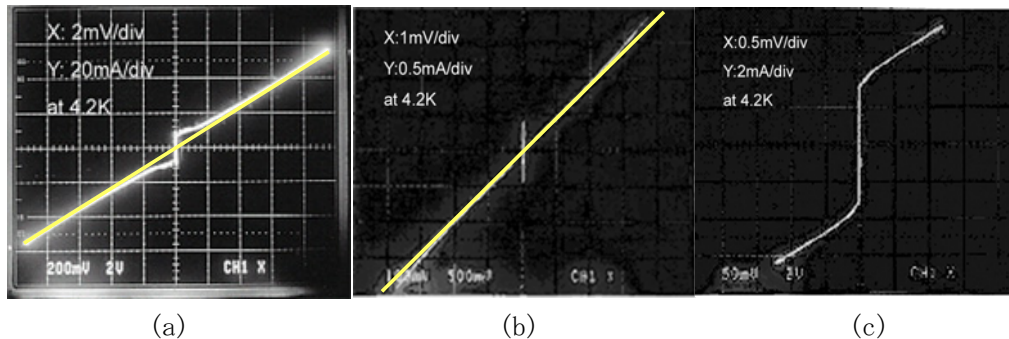


図 13 ECR プラズマによる表面改質積層ジョセフソン接合の電流-電圧特性。(a)YbBCO/YBCO 接合. 黄色の線は線形の常伝導抵抗を示す. (b)および(c)同一チップ上の YBCO/YBCO 接合. (b)中の黄色の線は、原点付近でフィッティングした常伝導抵抗.

し、標準偏差は臨界電流値に対し 6.9%、 $I_c R_n$ 積(最も重要なジョセフソン接合の品質パラメータ)に対しては 5.4%にまで下がった。このばらつきの値は、他の研究機関でランプエッジ接合において報告されている値とほぼ同等の値である。

単独の接合の特性に目を向けると、YbBCO/YBCO 接合は臨界電流密度 $2\text{kA}/\text{cm}^2$ で、 I - V 特性上にヒステリシスのないオーバーダンプ特性が得られ、かつ $I_c R_n$ 積が 2mV と大きい。これは(b)の YBCO/YBCO 接合が 0.5mV 程度の $I_c R_n$ 積しかなく、かつ I - V 特性上にヒステリシスが出現するアンダーダンプ特性を示しているのと対照的である。YbBCO/YBCO 接合は、最大で $I_c R_n$ 積は 2.6mV にまで達し、同じ臨界電流密度のランプエッジ構造のジョセフソン接合と比べ 4 倍、PGO 添加無し積層構造 YBCO/YBCO 接合と比べ 2-4 倍、PGO 添加積層構造 YBCO/YBCO 接合と比べても 2 割程度大きな値を示した。

I - V 特性上において電圧の発生している領域の特性を準粒子特性と呼ぶが、これはトンネル障壁層の構造をよく反映した特性となる。具体的には、(a)で見られるように、YbBCO/YBCO 接合では準粒子抵抗は線形であるのに対し、YBCO/YBCO 接合では(b)のように非線形性が観測された。このことは、図 14 の抵抗-温度特性にも反映されている。図 14 は、 4K における臨界電流密度が同じ程度、すなわち、トンネル障壁の透過率がほぼ同じと考えられる積層 YbBCO/YBCO 接合と YBCO/YBCO 接合の常伝導コンダクタンス $G_n (=1/R_n)$ の温度依存性を表している。赤いマークが YbBCO/YBCO 接合、緑が YBCO/YBCO 接合に対応する。図から明らかなように、YBCO/YBCO 接合では、温度上昇とともに G_n が上昇していることが分かる。 I - V 特性の準粒子特性の非線形性と合わせて、この結果はトンネル障壁中に多くの局在準位が存在していることを示唆している。すなわち、準粒子は高温領域、高電界領域では 2 個以上の局在準位を介して他方の超伝導電極へと移るプロセスが主となっている。局在準位は、 $I_c R_n$ 積の低下を導くほか、雑音源ともなる。また、トンネル障壁が面内で均一でないことを示唆しており、ばらつきの観点からも望ましくない。これに対し、YbBCO/YBCO 接合の常伝導コンダクタンスはほとんど温度に依存しない。これは、トンネル障壁中に存在する局在準位が少ないことを意味している。これまで、ランプエッジ構造の接合においては温度に依存しない常伝導コンダクタンスは観測されていたが、積層構造においては、PGO を添加した接合であっても、若干の温度依存性を持っていた。この観点から、YbBCO/YBCO 接合のトンネル障壁は、均質でかつ絶縁性が高くなっていると推測される。

〈ECR プラズマと RF プラズマによる YbBCO/YBCO 接合特性の比較〉

ECR プラズマによる積層型 YbBCO/YBCO ジョセフソン接合が優れた特性を示したので、RF プラズマによる表面改質を施した積層型 YbBCO/YBCO ジョセフソン接合を作製し、プラズマプロセス依存性を調べた。評価は、通常の電流-電圧特性のほか、TEM による断面解析、エネルギー分散型蛍光 X 線 (EDX) 分析による組成の深さ方向の変化の観察を行った。

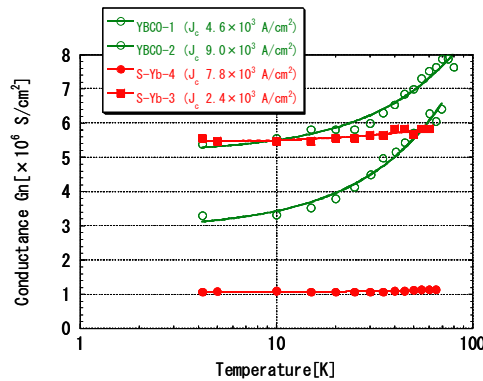


図 14 積層構造 YbBCO/YBCO 接合と YBCO/YBCO 接合の常伝導コンダクタンスの温度依存性.

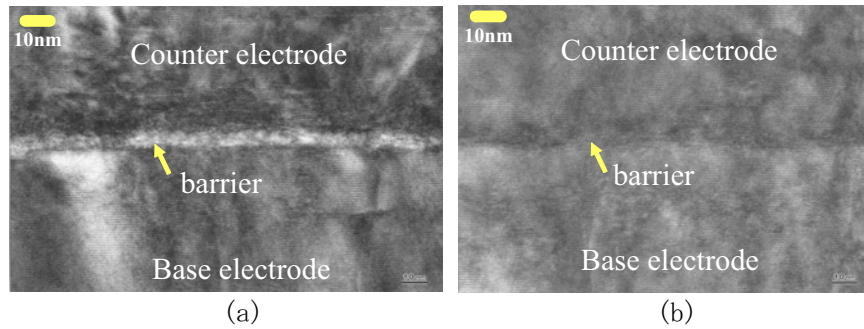


図 15 トンネル障壁近傍の TEM イメージ. (a)RF プラズマによる表面改質、(b)ECR プラズマによる表面改質

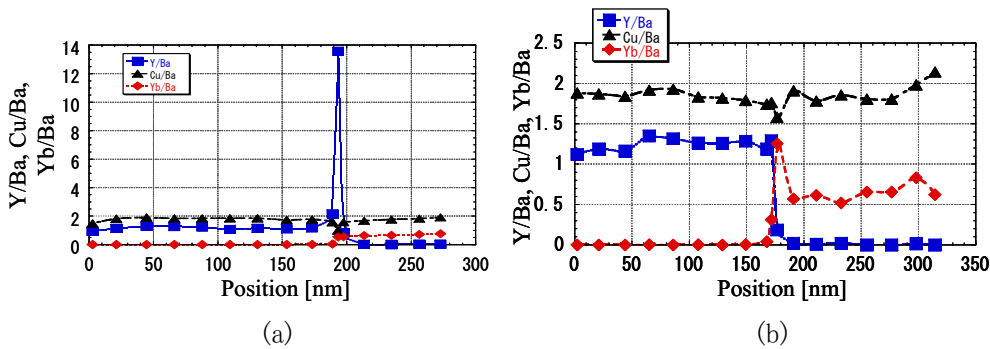


図 16 トンネル障壁近傍の深さ方向 EDX 分析. (a)RF プラズマによる表面改質、(b)ECR プラズマによる表面改質

電流-電圧特性に関しては、図 13(c)と同様に、リーク電流の多い特性を示した。図 15 は、RF プラズマによるジョセフソン接合 (同図(a))と ECR プラズマによる接合 (同図(b))の断面 TEM 写真である。RF プラズマによる接合には明確なトンネル障壁層が見えているのに対し、ECR プラズマによる接合には明らかな層構造のトンネル障壁は確認されない。より詳しい解析によると、RF プラズマでは多くの粒状の Y_2O_3 結晶がトンネル障壁層に並んでおり、ECR プラズマでは結晶の歪や CuO_2 面の不連続が観測された。

図 16 は両者の結晶の元素組成比を深さ方向に EDX 分析で調べた結果である。RF プラズマによる接合ではトンネル障壁部分で Y が非常に多くなっているのに対し、ECR プラズマによる接合では Yb が多くなっている。なお、両者ともプラズマによる損傷層の組成は Y-rich、Cu-poor となっている。TEM 観察や $I-V$ 特性とも合わせて考えると、RF プラズマの場合は、プラズマによる損傷層が凝集し Y_2O_3 へと再結晶化するとともに一部は YBCO となり、電気的なショートパスが形成されるものと考えられる。この状況はアモルファス層を人工的に堆積した場合とあまり変わらず、不均質なトンネル障壁が形成される。一方、ECR プラズマによる場合は、Yb がトンネル障壁層で過剰になり、しかも、 $(Y+Yb)/Ba$ は下部電極中の Y/Ba よりも大きな値を取る。損傷層には Yb は含まれていないことも考えると、上部電極形成時に、Yb が Ba サイトへ置換した結晶が形成されていることを強く示唆している。この置換によって超伝導を担う CuO_2 面へのキャリア (ホール) の供給が不足し、絶縁層化したものと考えられる。また、この置換によって Y_2O_3 の生成は抑制され、結果として均一なトンネル障壁が形成されると推測される。なお、先に示した PGO の効果は、ここで述べた Yb の効果とほぼ同様と現在は考えている。

一般に RF プラズマ中の粒子は、エネルギーの広がりが大きく、中には高エネルギーの粒子も含まれる。したがって、プラズマによる損傷が比較的表面から深い部分にまで及ぶほか、深さ方向の均質性が悪く、その結果良好な $I-V$ 特性が得られなかったものと解釈さ

れる。この解釈は、次項で述べる SWP による接合におけるステージ角度依存性とも矛盾しない。

〈ECR プラズマと RF プラズマによる積層型 YBCO/YBCO 接合〉

上述の実験から、プラズマ中の粒子のエネルギーが接合の品質に大きな影響を及ぼすことが推定された。そこで、我々の所有する装置の ECR プラズマよりも安定性に優れる SWP によって表面を改質し、接合の特性を評価した。なお、SWP では装置に付随していた Xe を表面改質用のガスとして用いた。

損傷層の組成比としては、ECR プラズマによる表面改質ジョセフソン接合の実験から、Cu/Y が 0.55–0.75、Ba/Y が 0.8–1.5 程度の範囲であれば比較的良好な接合特性が得られることが分かっていた。これをもとに SWP 装置において、平行平板の構造、すなわち入射角度 90 度でプラズマを引き出し、表面改質を施し、接合特性を評価した。しかしながら、 I - V 特性はすべてショート、もしくは漏れ電流の多い特性となった。そこで、ステージ角度を ECR プラズマ装置の場合と同じ 30 度となるように改造し、特性を評価した。その結果を、組成比とともに図 17 に示す。なお、ステージに印加するバイアス電圧がほぼ入射するイオンのエネルギーに対応していると考えてよい。この図からも、組成比が上述の範囲に収まると、比較的良好な特性が得られていることが分かる。現時点では、SWP によるジョセフソン接合では、PGO 添加 YBCO/YBCO 接合同程度の特性は得られているものの、ECR による YbBCO/YBCO 接合の特性を上回る結果を得ていない。つまり、プラズマの均質性が接合の均質性の向上や特性の向上に寄与するという明確な実験結果を得るにいたっていない。しかしながら、これはガスとして Xe を用いた効果が大きいものと考えている。原子量の大きな Xe イオンは Y、Ba、Cu を、ステージ電圧を変えてもほぼ同じ割合でスパッタする。その結果、プラズマパラメータを変えても、トンネル障壁層形成に適した元素組成比に近づきにくい状況となっていると判断している。現在、ガスを Ar に変更して、SWP による表面改質を行っており、その結果をもって最終的な判断をする予定である。

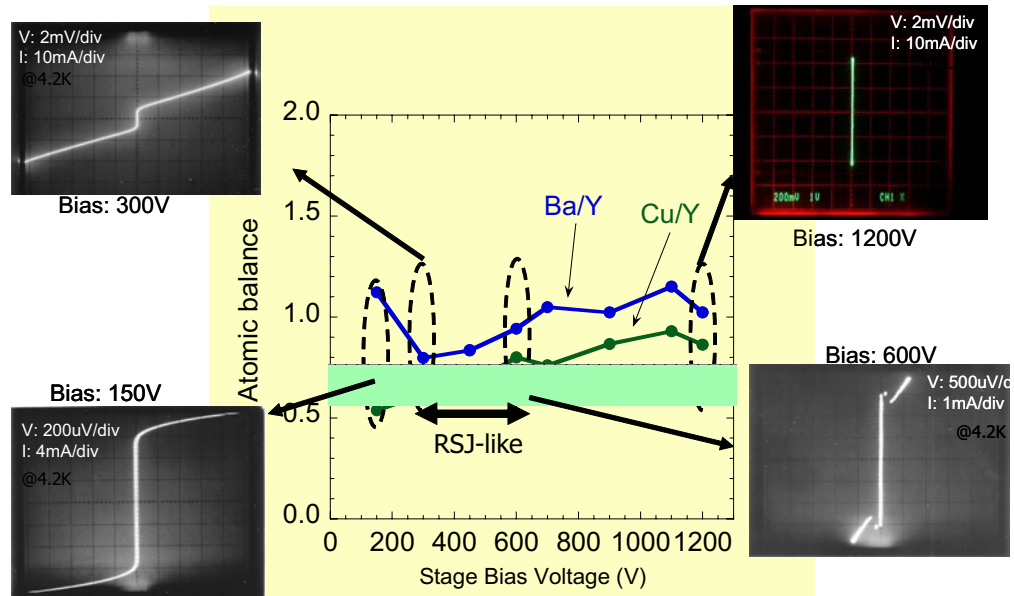


図 17 SWP によって形成したトンネル障壁前駆体(損傷層)の元素組成比のステージ電圧依存性とそれぞれの条件下での接合の I - V 特性.

[成果の位置づけ、類似研究との比較]

YBCO を用いて積層構造ジョセフソン接合を作製できる研究機関は、申請時から我々のグループのみであり、その状況は今も変化はない。その理由は、ランプエッジ構造のジョセフソン接合に比べ、構造が複雑であり、接合面積も大きいことからばらつきが大きくなるという危惧、 $I_c R_n$ 積は一般に臨界電流密度 J_c が高い方が大きいという傾向があり、 J_c の小さい積層構造は回路応用に不利と考えられていたためである。前者については、前頁までに記載したように、これまで研究されたことのないプラズマとの相関や Yb や Pr, Ga といった置換材料の役割を明確にすることによって、大幅な改善が見られた。図 18 は、その結果を端的に表すもので、 $I_c R_n$ のばらつき(標準偏差)と J_c の関係を示したものである。赤いマークはランプエッジ接合を表し、青い四角が積層接合に対応している。図中の矢印で示したように、種々の改善によって他機関のデータも含めたランプエッジ接合とほぼ同等のばらつき(5%)まで低減化に成功している。ランプエッジ接合では J_c が低い領域では、トンネル障壁層に Y_2O_3 が形成され、ばらつきが大きくなる傾向にある。本研究では、そういった領域でも良好な特性を得ており、トンネル障壁層形成の最適化が進んだ結果と考えている。また、プラズマから与えられる損傷の程度はプラズマにさらされる時間によって変化する。このことはランプエッジ構造の接合は本質的に不均質なトンネル障壁層を抱え込む可能性があることを示唆している。積層構造の優位性がこの点からも明らかとなったほか、ランプエッジ構造の接合の特性改善に向けても、今回得られた知見は有効に働くと考えている。ばらつきの観点から考えると、今回の成果では回路化にはまだ不十分である。したがって、より一層の努力が必要であることは言うまでもない。現在研究中である SWP は、プラズマの均質性の点で改善へ向けた依然として有力な候補と考えている。

一方、図 19 は、これまで作製した種々のジョセフソン接合の $I_c R_n$ 積と J_c の関係をプロットしたものである。図中の◆がランプエッジ接合、残りは積層接合である。▲が PGO の添加のない YBCO/YBCO 接合、▼が PGO 添加の YBCO/YBCO 接合、■が SWP による YBCO/YBCO 接合、そして●が YbBCO/YBCO 接合である。この図から明らかなように、PGO 添加と同等の効果を、SWP を利用することによって PGO の添加のない YBCO/YBCO 接合で実現したほか、YbBCO/YBCO 接合ではランプエッジ接合並みの $I_c R_n$ 積をより低い J_c で実現した。このことは、積層構造ジョセフソン接合のポテンシャルの高さを実証するものである。なお、このような一連の研究に関して、現在世界的に見ても類似研究は見当たらない。

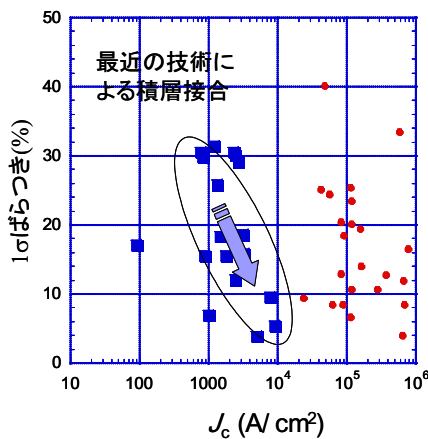


図 18 ランプエッジ接合(赤)と積層接合(青)の $I_c R_n$ 積のばらつき(標準偏差)と J_c の関係

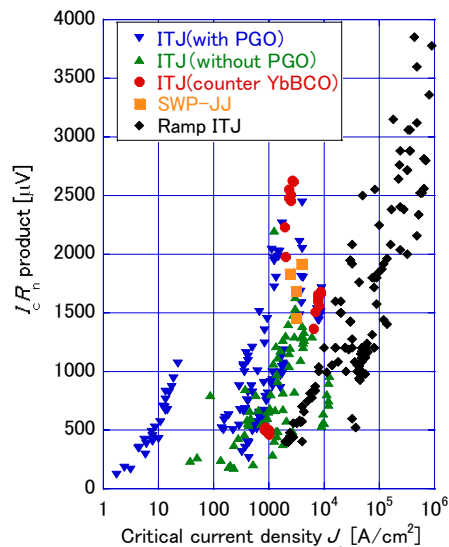


図 19 各種接合による $I_c R_n$ 積と J_c の関係

(e) 分周回路の試作・評価

[実施方法・実施内容]

図 19 で示したように、積層構造ジョセフソン接合の $I_c R_n$ 積の値は最高値で比べるとランプエッジ接合のそれに及ばない。このことは、単純に接合単体のポテンシャルだけで判断すると、相変わらずランプエッジ接合の方が高速性に対し優位であることを示している。しかしながら、ランプエッジ接合は構造的に接合と直列に無視できないインダクタンスが寄生し、それが実際の回路マージンの低下や動作周波数の低下を招く。

単一磁束量子回路 (SFQ 回路) の動作周波数をもっとも端的に表す回路として Toggle Flip-flop (TFF) が知られている。この回路は、入力に繰り返し周波数 f の連続したパルス列を入れると、出力に $f/2$ のパルス列が現れる。すなわち、 $1/2$ 分周回路として働く。ジョセフソン接合では、周波数と接合の電圧 V は

$$V = \Phi_0 f \quad (1)$$

の (Φ_0 は磁束量子、 2.07×10^{-15} Wb) の等式で完全に関係付けられるため、平均電圧を測定するだけで動作周波数を見積もることができる。また、TFF による動作評価回路はジョセフソン接合数が 10 個弱で構成可能で、他の回路に比べ比較的作製が容易である。このことから、以前より SFQ 回路の動作周波数の指標として用いられてきた。

本研究では、実際に積層接合を用いて TFF を構成し、その動作周波数を見積もることを目指した。TFF の作製には、配線のため、通常の単独ジョセフソン接合よりも超伝導層を 1 層多くする必要がある。すなわち、この実現には、すでに 3 層のエピタキシャル成長薄膜の上に、さらに層間絶縁層の堆積、コンタクトホール形成、配線 YBCO の堆積といった課題を克服する必要がある。他の研究機関が、積層接合の開発を逡巡する理由のひとつは、この構造の複雑さにある。我々は、層間絶縁層に PGO を用い、またコンタクトホール形成条件を見出し、TFF を試作、本研究の総仕上げとして動作周波数の評価を試みた。

図 20 はその測定結果である。入力電圧 V_{in} が約 1mV の領域まで出力電圧 V_{out} の 2 倍と一致していることが分かる。(1)式により、これを周波数に直すと、500 GHz となる。目標は、本研究のタイトルに現れる 1THz であったが、 $I_c R_n$ 積が小さいこともあり、残念ながら現時点では、その半分の値にとどまっている。しかしながら、高温超伝導ジョセフソン接合を用いた回路の周波数としては、最高値を更新しており、積層接合の高いポテンシャルは示せたと自負している。

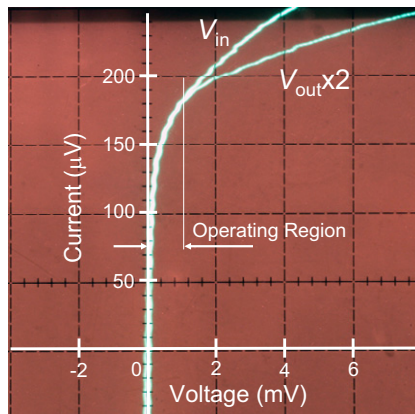


図 20 TFF(分周回路)の電流-電圧特性. 入力電圧 V_{in} が出力電圧 V_{out} の 2 倍と一致する領域までが正常動作. 電圧と周波数は(1)式で関係付けられる.

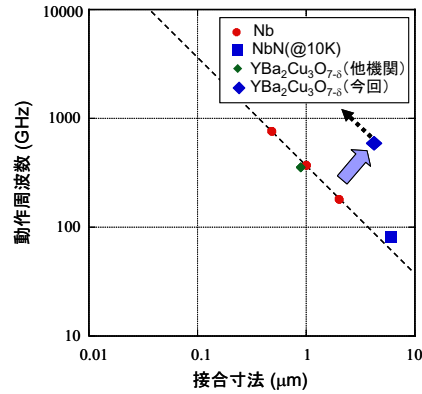


図 21 各種接合による TFF 動作周波数と接合寸法の関係

[成果の位置づけ、類似研究との比較]

米国において高温超伝導ジョセフソン接合の開発に対する支援が打ち切られた理由の1つが TFF で示された SFQ 回路の動作周波数である。5 年前の時点でその値は 100GHz 超であり、Nb ジョセフソン接合で示された 760GHz に遠く及ばなかった。日本では、2006 年に超電導工学研究所のグループが 370GHz を達成している。図 21 は接合寸法と TFF の動作周波数の関係を示しており、図中の直線は、微細化とともに周波数が改善していく指標を表している。超電導工学研究所のデータも図中破線で示した直線上に位置していることから、5 年前からは大きく改善したものの、高温超伝導ジョセフソン接合の高いポテンシャルを示すにはいたっていなかった。これに対し今回の我々のデータは、接合寸法が 5 μm 角程度でありながら、500GHz を達成しており、高速性の観点で高温超伝導の SFQ 回路素子としての優位性を示す初めての例といえる。現在、残りの研究期間で、高い $I_c R_n$ 積を持った接合で 1THz を超える TFF の開発を目指している。もしこれが達成できれば、高温超伝導ジョセフソン接合、とりわけ積層構造ジョセフソン接合の開発に再び取り組む研究機関が現れるものと期待している。

(f) 二重ジョセフソン接合の作製と検討

[実施方法・実施内容]

高温超伝導ジョセフソン接合は、Nb ジョセフソン接合と比べ、出力電圧が高い。この特徴を利用して、すでに大規模化が進んでいる Nb-SFQ 回路の出力インターフェイスへ応用することを考えた。しかしながら、出力電圧は $I_c R_n$ 積とはほぼ同じであることから、現在の高温超伝導ジョセフソン接合では依然として出力電圧は十分ではなく、2 倍以上の高電圧化が必要である。本質的には、高温超伝導ジョセフソン接合の $I_c R_n$ 積を上げる必要があるが、短期的には構造的に見掛け上の $I_c R_n$ 積を上げる試みも求められる。

見掛け上の $I_c R_n$ 積を上げるには接合を2つ直列に接続し、その2つを同期スイッチさせれば良い。我々は、すでに Nb ジョセフソン接合の2重接合(Nb/AIO_x/Nb/AIO_x/Nb 構造)を試作し、世界で初めて同期スイッチの実証に成功していた。しかし同期スイッチには、中

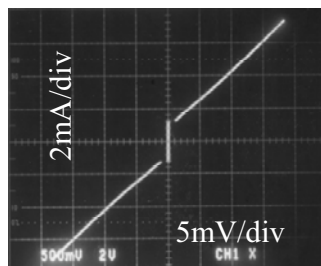


図 22 YBCO/YBCO/YBCO2 重接合の電流-電圧特性.

間 Nb を薄くし 2 つの接合をインダクティブ結合させることが不可欠であったため、中間 Nb の臨界温度が低下し、単独接合の 2 倍の $I_c R_n$ 積を得るにはいたらなかった。幸い、高温超伝導体ではコヒーレンス長が短いため、中間層の臨界温度の低下は起こらない。図 22 に中間層の YBCO を 10nm とした接合の $I-V$ 特性を、示す。図に示すように、1 つの接合のように振舞っており、見掛け上の $I_c R_n$ 積は 3mV と単独接合の約 2 倍の特性が得られた。比較的強い磁場を印加すると、結合が崩れ、2 つの接合が独立に振舞う。このことから、この接合が同期 2 重接合であることが実証された。

[成果の位置づけ、類似研究との比較]

2 重接合は、積層構造ジョセフソン接合でのみ実現可能である。したがって高温超伝導体での類似研究はない。Nb や NbN の接合では我々の以前のデータも含め報告例があるが、いずれも見掛け上の $I_c R_n$ 積は小さい。したがって今回のデータは、本研究の優位性を示す一例と言える。また、出力インターフェイス応用への 2 重接合の適用は、近未来の本研究の成果の適用先を示すものとして重要な位置づけとなると考えている。しかしながら、10Gbps を保障する出力インターフェイスには 6-10mV の見掛け上の $I_c R_n$ 積が必要となる。現時点では、その値に達しておらず、引き続き単独接合の $I_c R_n$ 積の向上に向けた取り組みが重要である。

(1-2) ナノブリッジの作製と光入力(名古屋大学と近畿大学の共同、期間全体で実施)

[実施方法・実施内容]

SFQ 回路と光信号の入出力インターフェイス実現のための基盤技術として、超伝導ナノブリッジ作製方法の検討を行った。ナノブリッジは単膜で作製可能なデバイスで高速性についても、以前の我々の研究成果で実証されている。本研究では、更なる微細化を図るため電子ビーム描画を導入し、その $I-V$ 特性や磁場特性、光応答特性を評価した。

作製に際し、電子ビームソグラフィにおける最適ドーズ条件の導出を行い、また ECR プラズマエッチング時の温度上昇による超伝導特性の劣化を防ぐための冷却法の工夫を行った。その結果、これまでの報告よりも細い最小線幅 50nm の $YBa_2Cu_3O_y$ ナノブリッジ(図 23)で超伝導電流(臨界電流密度 $8.4 \times 10^7 A/cm^2$)を観測した。この電流密度は、非常に高くナノブリッジの側壁等からの劣化が抑えられていることを意味している。また、最小線幅 80nm のナノブリッジを超伝導ループ内に 2 個設け、量子干渉計(SQUID)の構造を形成し、出力電圧の磁場応答を観測した。図 24 がその結果である。磁束量子 Φ_0 単位での変調が観測されることから、このナノブリッジが、磁束量子を 1 個ずつ出し入れする能力、すなわち、ジョセフソン接合と同等の機能を有することが実証された。

図 23 の SQUID のホール面積は、 $1\mu m$ 角程度に相当することから、斗内グループで実施している光出力回路用デバイスとして十分用いることができる。一方、高速性については、 $I-V$ 特性上に判断の基準となる kink 構造が見られなかったことから、評価にいたっていない。臨界電流値直上の抵抗値や図 24 の変調深さなどから判断すると、まだ十分な高速性を得られていないと判断している。

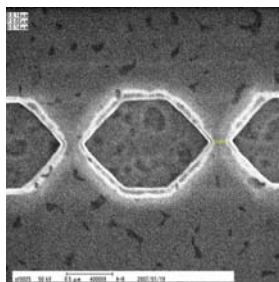


図 23 50nm 幅ナノブリッジ SQUID SEM イメージ

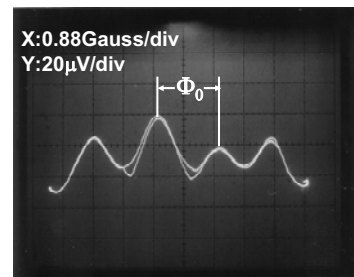


図 24 ナノブリッジ SQUID の出力電圧の磁場応答.

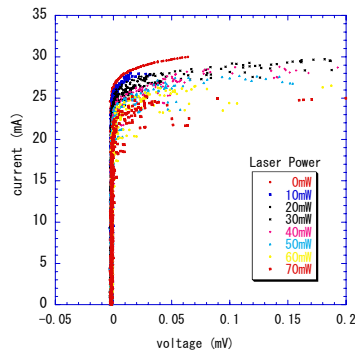


図 25 400nm 幅のブリッジの光照射効果. I - V 特性上で臨界電流の低下が観測される.

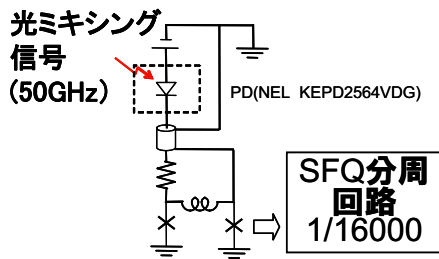


図 26 PD による光入力回路実験

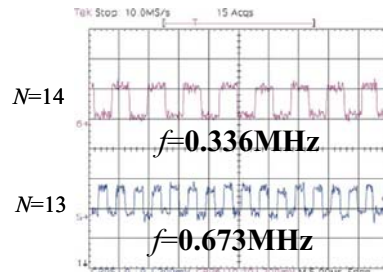


図 27 分周回路出力例

次の実験として、光入力素子を想定し、幅 400nm のブリッジで光応答特性を評価した。図 25 に示すように 70mW のレーザー光の照射に対し I_c が 15%減少(26.5→22.5mA)した。これは、光照射による超伝導電子対密度の減少を仮定した計算値(2~5%)と比較した場合数倍大きく、熱的な要因が複合効果として含まれている可能性がある。熱的效果を避けるには、臨界電流値を下げるのが必須であり、そのために線幅の細いナノブリッジを用いて、現在測定に臨んでいる。

光入力に関しては、フォトダイオード(PD)に波長の異なる2つのCWレーザー光を導入し、光ミキシングによるビート信号を発生、それによって高周波 SFQ 信号を発生する実験も試みた。この回路は、高周波クロック信号として利用できるほか、SFQ 回路と室温のエレクトロニクスとの同期も可能とする。図 26 が、実験を行ったブロック図であり、高周波のビート信号が Nb による 1/16000 分周回路によって低周波に変換され、オシロスコープによって観測できるシステムとなっている。図 27 は、その実験結果であるが、出力周波数は入力 1/16000 で 0.336MHz であることから、5.5GHz の光ビート信号が、入力で発生し、SFQ 信号へ変換されていることを示している。この実験結果は、高周波光信号が、SFQ 信号へ変換された初めての実験データとなる。この実験では、PD と SFQ 回路の接続部分の帯域幅が十分でなかったため、これ以上の高周波の実験は行わなかったが、UTC-PD を用いれば、100GHz 程度の信号の入力も十分可能となる。

[成果の位置づけ、類似研究との比較]

光入力に関しては、最近になって幾つかの研究機関が PD や MSM 光スイッチを用いた研究に着手している。本研究はその先駆けであり、とりわけ PD による光/SFQ 変換は、直接的に高周波信号を観測した例として高く評価されている。しかしながら、PD 自身の発熱の問題があり、現在、我々は斗内グループの報告、あるいは本項目で示したように、接合もしくはナノブリッジへの光直接照射へと研究をシフトしている。この方針の変更理由も本研究

の大きな成果とも言え、光入力の研究をしている研究グループに示唆を与えるものと考えている。

一方、ナノブリッジの研究に関しては、これまで世界の幾つかの研究機関で研究が行われてきた。ただし、YBCO を用いたナノブリッジに関しては、本研究グループが 180nm 幅のナノブリッジを用いて最高の変調深さと高速性を実証した実績を持っている。当時は集束イオンビームを用いていたため更なる微細化は困難であったことから、今回は電子ビーム描画装置を用いて、その記録の更新とインターフェイスへの適用の可能性について検討した。本研究において、線幅については大幅な更新がなされたもの、変調深さなどの特性の更新はなされなかった。得られたナノブリッジの臨界電流値が非常に高いことから側壁の損傷が大きいとも考えにくく、現在特性劣化の原因を検討中である。可能性としては、側壁ではなく EB レジストと接するブリッジ上部が何らかの劣化を起し、磁束量子の運動を阻害している可能性がある。

ナノブリッジを利用した光入力、光出力の研究は、世界的に見ても本研究が最初の取り組みであった。しかしながら、この 5 年の期間中に超伝導を用いた量子通信用の単一光子検出器 (SSPD) の研究が急速に進展してきた。SSPD は、超伝導細線をミアンダ上に配置し、光子の当たった部分が常伝導状態になることを利用したデバイスである。また、X 線などの粒子を高エネルギー分解能で検出するための検出器として、やはり超伝導細線を用いた kinetic inductance detector (KID) が提案され、構造の簡便さと多重化のしやすさで現在活発に研究されている。このように、ナノブリッジも含めた超伝導細線の応用は一気に広がりを見せており、その中で、本研究で培われた微細加工技術は大きな貢献をしていくものと確信している。なお、細線中の磁束量子の動きや検出器としての性能評価、システム化などについては、これまでの枠組みを超えた複合領域となることから、領域横断企画において、2005 年より 3 年にわたりワークショップを開催し、新しい研究領域の形成に向けての第一歩とした。

(2) 研究成果の今後期待される効果

高温超伝導体ジョセフソン接合の研究は、残念ながら世界的に見ると縮小の方向へ向かっている。その理由としては、先に述べたように高温超伝導ジョセフソン接合の特性ばらつき大きさや再現性・制御性の不十分さ、世界的に主流のランプエッジ構造接合の高速回路動作の未実証といった技術的な課題があげられる。これらの課題に対しては、本研究の成果は大きな貢献をしたと考えている。

しかしながら研究縮小の方向の理由として、何と言っても大きいのは、開発の駆動力となるべき「キラーアプリケーション」の不在、すなわち目指すべきターゲットの不在にあると考える。Nb による SFQ 回路は、すでに 1 万個以上のジョセフソン接合を集積化するレベルに達し、現在は 100 万個以上の集積化によるハイエンドルータやプロセッサなどの開発にプロセス、設計、アーキテクチャといった各方面からのアプローチがなされている。これに対し、材料的に未熟な高温超伝導は、小中規模回路をより高速に動作させるか、より高温で動作させるか、もしくは Nb などの超伝導体では実現できない機能を見出すかしか道は残されていない。

その答を提示するのも、本研究の任務と考え、これまで幾つかの提案をしてきた。1つは、高精度アナログ/デジタル変換器の初段変調器である。現在数十 GHz (半導体では 1GHz 以下、ただし回路の工夫により高 SNR 化) で動作している変調器を 200GHz 程度にまで向上することで、扱えるアナログ信号の帯域幅の大幅な向上を見込むことができる。この回路は、船舶、航空機の無線などさまざまな周波数の電波を利用している移動体に搭載する無線機を大幅に簡略化することを可能にする。また、 $L_c R_n$ 積の向上は、デジタル的な手法で高感度電流計を構成するデジタル SQUID を実用レベルにまで押し上げる。これらの応用は、接合数が数百個程度で実現可能で、しかも有用性が高い。本研究では、このような応用も視野に入れ、Nb 回路とのハイブリッド化などの提案も行っている。これらの応用は、世界的に認められ始め、幾つかの研究機関がフィージビリティスタディを始めるに至っている。

本研究は、高温超伝導体のポテンシャルの高さを改めて示すことに成功しており、再び高温超伝導接合開発の機運向上へ向けた一歩となると考えている。

一方超伝導細線については、この 5 年間で大きな進展があった。前項で述べたように、検出器応用へ向け、本研究は技術的な貢献をしたとともに、領域横断企画を契機に新しい研究者コミュニティの形成に寄与した。今後は、このコミュニティによって、海外に比べ若干遅れをとっている超伝導検出器研究が発展していくものと期待している。

3. 2 光インターフェイス開発(大阪大学 斗内グループ)

申請時に設定した目標と達成状況、その他特記事項として全体をまとめる。その後、実施項目ごとに、研究実施内容及び成果を記載する。

項目	開発目標	達成状況	達成度自己評価 (5段階)
光ミキシング磁束量子発生ゲートの開発と SFQ 光入力インターフェイスの構築	フォトミキシングを用いたサブテラヘルツ光入力システムの開発、およびフェムト秒パルスを用いた単一磁束量子の発生と制御	フォトミキシングを用いた 95GHz の光信号入力に成功。また、ジョセフソン磁束フロートランジスタ型光入力素子の光応答速度が 5ps 以下である事を実証。フォトダイオードを用いた光/SFQ 入力インターフェイスを開発。	5
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	磁気光学効果を用いた単一磁束量子の静的・動的観察、および光出力インターフェイスに向けた基盤技術の開発。	磁気光学効果を用いた高温超伝導体中の磁束量子観測に初めて成功。高速かつ高感度なレーザーMO顕微鏡の開発に成功。磁束フロートランジスタにおける交流磁場を観測。	5
その他特記事項	・光/HTS-SFQ入力回路、Nb-SFQ回路用フォトミキシング入力およびナノブリッジの光応答では藤巻グループと協力		

(1)研究実施内容及び成果

光インターフェイス開発においては、研究実施項目として**1)フォトミキシング磁束量子発生ゲートの開発と SFQ 光入力インターフェイスの構築**、および**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**、の大きく分けて二つの課題を遂行した。以下にそれぞれの項目における研究内容および成果の詳細を説明する。

研究実施項目1):フォトミキシング磁束量子発生ゲートの開発と SFQ 光入力インターフェイスの構築

i) 超伝導デバイス制御用フォトミキシングシステムの開発

SFQ 光入力インターフェイスを構築するにあたり、入力する光信号の形態としては、光ミキシングにより発生させた超高速光変調信号、またはフェムト秒パルスレーザーによる極短光パルスの利用を想定して研究開発を行った。本項ではフォトミキシングを用いた光入力システム開発について述べる。フォトミキシングは、波長がわずかに異なる 2 つのレーザー光を高速な光伝導特性をもつフォトミキサーに入力する。フォトミキサーでは 2 つのレーザーの差周波数に対応した光電流が発生する。この技術を用いることで、100GHz 程度の光変調信号を比較的容易に発生することができる。我々は光ミキシングにより生成した数十 GHz の光信号を、高速光伝導素子を用いて光-電気(EO)変換し高周波電流として入力し、それをジョセフソン接合のシャピロステップ(ジョセフソン接合に交流信号を加えたときにその周波数に対応した電圧に直流電流が流れる現象)として検出するシステムを開発した。これ

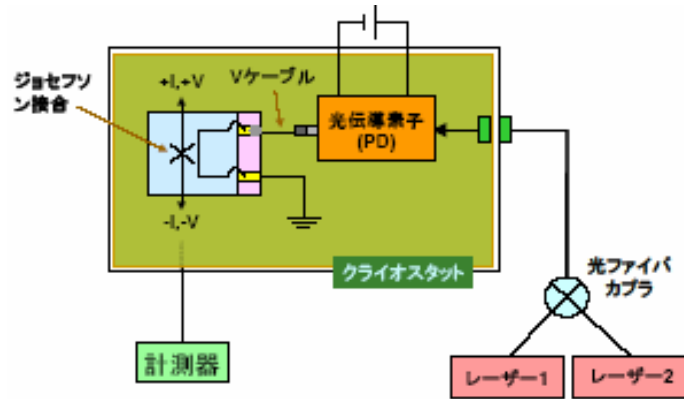


図 28 光/SFQ インターフェイスシステムの模式図

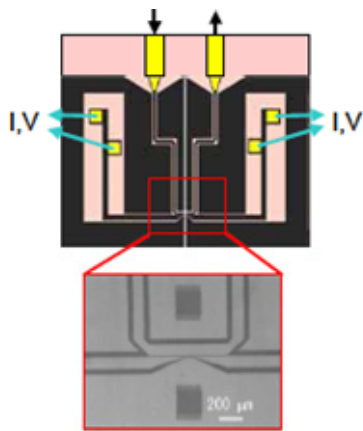


図 29 ジョセフソン検出素子の模式図
および電子顕微鏡写真

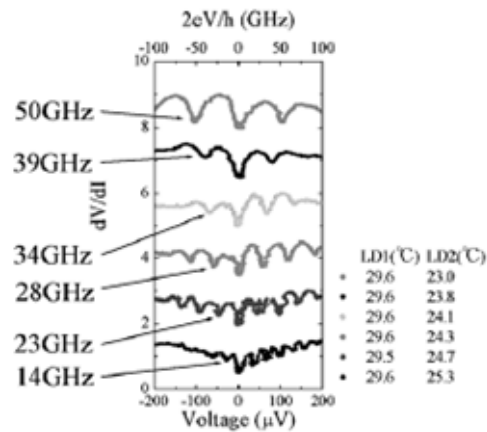


図 30 帯域 40GHz の pin-フォトダイオード (PD)を用いたときのジョセフソン接合の $dV/dI-V$ 曲線

は光インターフェイスの入力段に相当する。図 28 は今回作製したフォトミキシング信号入力・検出システムの模式図である。高速フォトダイオードにより光信号から高周波電磁波へと変換され、同軸ケーブルおよび超伝導コプラナー伝送線路によりジョセフソン接合近傍まで伝達される。図 29 は伝送線路およびジョセフソン接合を含む、素子構造の模式図およびジョセフソン接合近傍の顕微鏡写真である。ジョセフソン接合と伝送線路の距離は約 $3\mu\text{m}$ である。図 30 は帯域 40GHz (3dB 減衰) の pin-フォトダイオード (PD) をフォトミキサーとして用いたときのジョセフソン接合の $dV/dI-V$ 曲線の周波数依存性である。約 50GHz までの高周波信号の周波数検出に成功した。さらに、フォトミキサーとして帯域 100GHz の単一キャリア走行フォトダイオード (UTC-PD) を用いた場合は、図 31 に示すように多少シグナルは弱くなるが、95GHz までの信号検出に成功した。このように、フォトミキシングによるサブテラヘルツ領域の光入力についての基盤技術の開発は当初の目標をほぼ達成した。

これらシステム開発と並行して、 $1.5\mu\text{m}$ 通信波長帯で応答可能な新たな光伝導材料の開発を行った。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材料として InGaAs が良く知られている。InGaAs はバンドギャップが約 0.73eV 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を注入することにより InGaAs の高抵抗化をおこなった。この鉄イオン注入した InGaAs 光伝導素子 j を作製し、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る舞いを明らかにした。その結果図 32 に

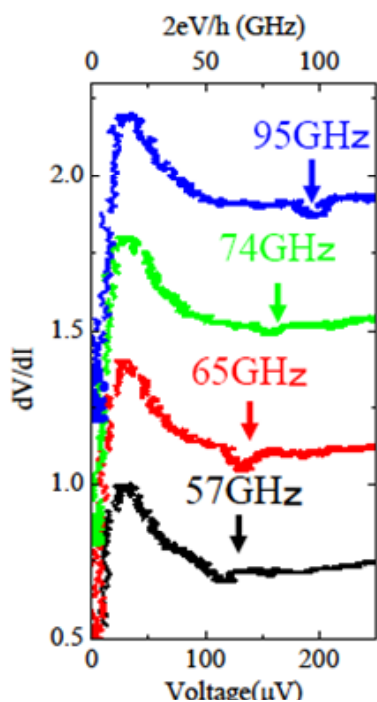


図 31 UTC-PD を用いたときの
ジョセフソン接合の dV/dI - V 曲線

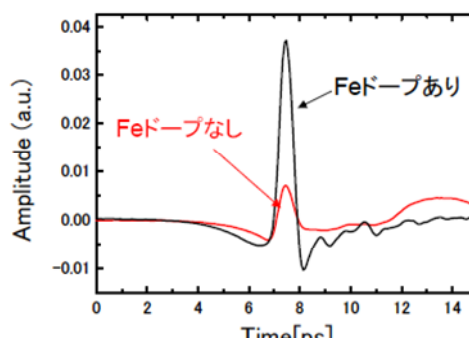


図 32 InGaAs 光伝導素子の Fe イオン注入
効果

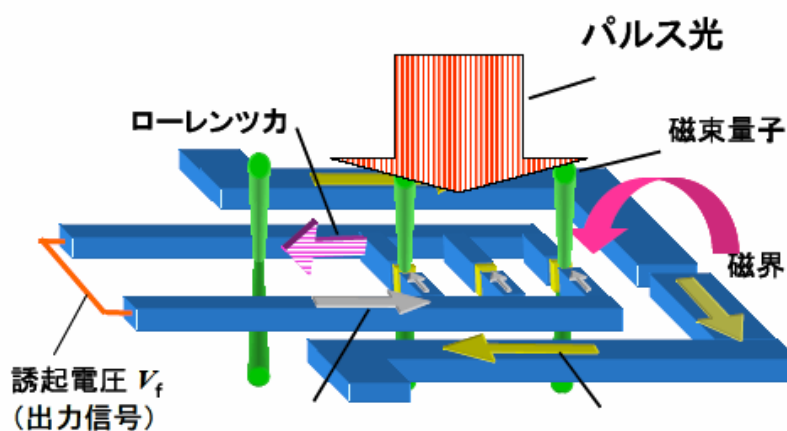


図 33 磁束フロートランジスタ型光入力インターフェイスの概念図

示すように、従来の数倍の高い変換
能な高速な波長 $1.5 \mu\text{m}$ 対応光伝導
ることにより、前述したフォトダイオー
換素子として利用できる可能性があ

効率を持ち、かつテラヘルツ領域で動作可
スイッチの開発に成功した。本材料を使用す
ドよりも簡易な構造を持ちかつ高速な EO 変
る。

ii) 磁束フロートランジスタ(FFT)形成技術の確立とそれによる光制御型磁束量子発生ゲート
の動作検証

前述のフォトミキシングによる入力と並行して、高速な光パルスを用いたデジタル信号を
利用した光入力素子の開発を行った。このようなパルス光を単一磁束量子に変換し、SFQ
論理回路へと伝送する機構として、我々は磁束量子フロートランジスタ(FFT)構造の利用を
提案した。図 33 はその動作機構の概略図である。FFT は制御電流ラインに電流を流すこと
によって外部磁場を発生させ、その結果超伝導ブリッジまたはジョセフソン接合(チャンネ

ル)に生じた磁束量子が、チャンネルをフローするときの誘導起電力を出力するものである。1990年代には盛んに研究されたが、3端子素子としてはゲインが小さいなどの問題があり、最近はほとんど研究が行われていなかった。我々は、光パルスをチャンネル部分に照射することにより超伝導電流を高速に変調し、かつ制御電流により発生させた外部磁場を組み合わせることにより、磁束量子を発生・制御する機構が、光インターフェイスとして機能すると考えて、高周波領域の動作を検証した。

超伝導磁束フロートランジスタにはチャンネル部分に超伝導弱結合ブリッジを用いる超伝導磁束フロートランジスタ型(SVFT)とジョセフソン接合を用いるジョセフソン磁束フロートランジスタ型(JVFT)があり、それぞれ一長一短がある。我々は、ナノブリッジを用いた SVFT 型構造と JVFT 型構造のそれぞれについて研究を進めた。本項目では JVFT についての結果を説明する。ナノブリッジについては藤巻グループの欄で報告済みである。

JVFT はチャンネル部分にジョセフソン接合を用いており、ジョセフソンボルテックスは、中心に常伝導コアを持たないため、フローによる損失が非常に小さく、フロー速度は光速と同程度である。このことから、本質的に SVFT に比べて 2~3 桁高速な応答が期待できる。しかしながら、これまで JVFT の高周波動作を検証した研究はほとんどなく、本研究によりはじめてパルス電流入力およびパルス光照射に対する応答が計測された。

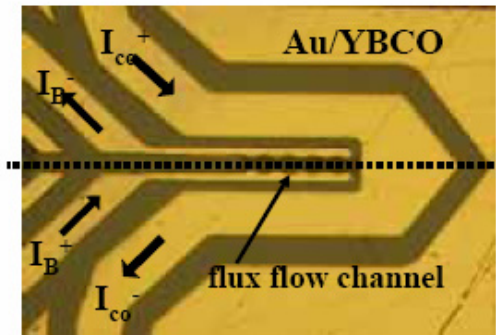


図 34 JVFT の素子構造

JVFT の作製には 24 度のバイクリスタル MgO(100)基板の膜厚 100nm の c 軸配向 YBCO 薄膜を使用した。図 34 は今回作製した、JVFT の素子構造である。チャンネルは 5 つのジョセフソン接合から構成され、バイアス電流 I_B がジョセフソン接合に流され、コントロール電流 I_{co} (入力信号)がその周りを囲うように流れている。図中の点線は基板の粒界位置を示している。チャンネル部分のみ YBCO 薄膜が露出しており、それ以外の部分はレーザー光を遮断するため Au 薄膜でコーティングされている。

図 35 はバイアス電流を一定としたときのコントロール電流 I_{co} に対するフロー電圧 V_f の変化を示す。電圧 V_f はチャンネル部分に形成されるそれぞれの超伝導ループに進入する磁束量子の個数に対応して周期的に変化する。ここで、各々のループに加わる磁束の合計 Φ_{tot} は $\Phi_{tot} = \Phi_{co} + \Phi_{self}$ と書ける。 Φ_{co} と Φ_{self} はコントロール電流およびバイアス電流によ

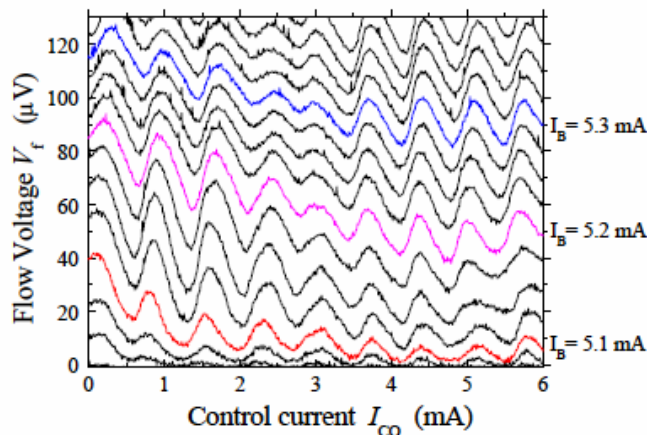


図 35 様々なバイアス電流 I_B における対するフロー電圧 V_f のコントロール電流 I_{co} 依存性

って、各ループに生成される磁束である。磁束 Φ_{co} は $\Phi_{co} = M I_{co} / (N-1)$ と書くことができる。 M はコントロールラインとチャネルの間の相互インダクタンス、 N は接合数である。一方、 Φ_{self} は L をループのインダクタンスとすると、 $\Phi_{self} = L I_B / N$ と表すことができ、自己磁場 Φ_{self} は I_B にほぼ比例して増加する。この増加量は図 35 において I_B の増加に伴う V_f の周期シフト量として見積もることが出来る。このように、磁束のフロー速度を決定する重要なパラメータであるインダクタンス成分について、直流電流計測の結果から $M=15\text{pH}$ 、 $L=10\text{pH}$ と見積もることが出来た。

次に、JVFT のチャネルにフェムト秒レーザーパルス照射し、そのときの出力変化を測定した結果について述べる。JVFT のチャネルにフェムト秒レーザーパルス照射することにより、クーパー対が解離し準粒子として励起される。最大ジョセフソン電流が瞬間的に減少し接合が電圧状態となる。このような現象は、磁束フロー間観点から見るとレーザー照射により磁束量子がジョセフソン接合を横切りフロー電圧を発生することに対応する。つまり、レーザーパルス照射することにより、JVFT は磁束量子発生ゲートとして動作させることが可能である。図 36 は実際にフェムト秒パルスレーザーを光チョッパーを用いて強度を変調したときの、出力電圧の変化である。出力電圧の光応答が明瞭に観測されている。また、図 37 はコントロールラインにパルス電流を入力し、同時にフェムト秒光パルスをジョセフソン接合に照射した時の出力電圧を示したグラフである。4段階の出力電圧が観測され、入力電流および照射する光パルスの双方で独立に出力を制御できる事を示している。すなわち、電流入力と光入力の AND や OR など簡単な演算が素子単独で可能である事を示しており、このような特性を利用した機能性光入力素子の実現が期待できる。

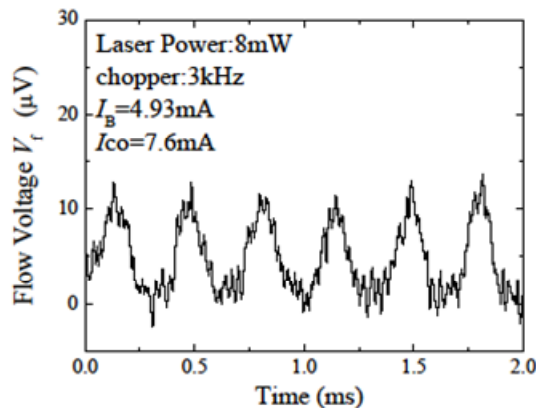


図 36 フェムト秒パルスレーザーを光チョッパーを用いて強度を変調したときの出力電圧の変化

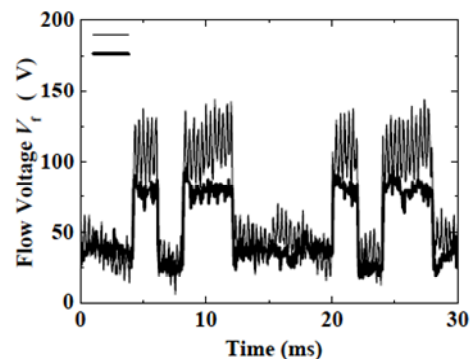


図 37 パルス電流およびパルス光を同時入力した時の出力電圧

iii) フェムト秒光パルスを用いた JVFT 型光入力素子の動作限界の抽出

前項において、JVFT 型光入力素子が、光入力インターフェイスとして動作することが検証されたが、計測した動作周波数は数 kHz と低速であり、実際にどの程度の速度で応答しているかは不明であった。これに対して我々は実際の応答速度を検証するためフェムト秒パルスレーザーをポンプ光とプローブ光の二つに分岐し、プローブ光の遅延時間を連続的に変化させ二つのパルス光の応答の相関を計測することにより、単一パルスに対する応答速度を実測することに成功した。

図 38 はポンプ・プローブ法を用いて計測した JVFT のパルス幅 100fs の光パルスに対する応答である。この実験から今回作製した JVFT の応答時間は 5ps 以下であることが明らかになった。この結果は、磁束フロー素子の出力電圧の応答速度を実験的に明らかにした最

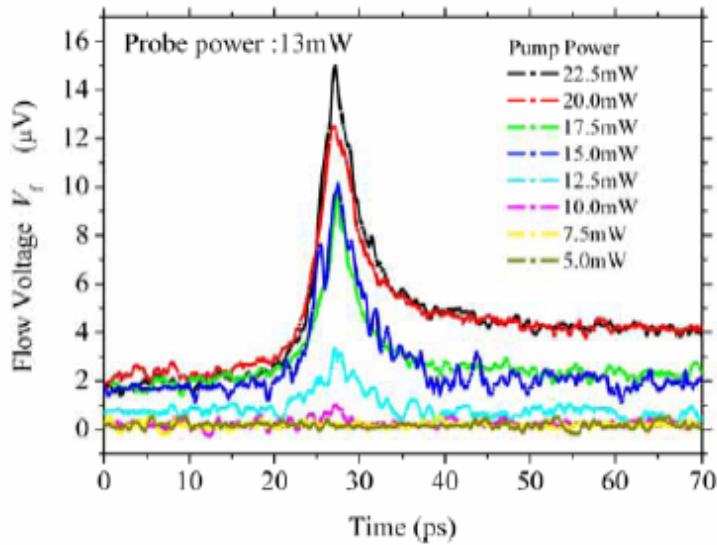


図 38 ポンプ・プローブ法を用いて計測した JFVT の光パルス応答

初の報告であり、JVFT がサブテラヘルツ領域の高速動作が可能である事を実証した。我々が以前超伝導ブリッジで行ってきたテラヘルツ放射の結果から、光パルスに対する超伝導電流の変調は、超伝導体の酸素濃度等を調整することにより、1ps 以下まで高速化可能であることが明らかになっている。今後、チャンネルのループ面積を縮小しインダクタンスを減らすなど、構造を最適化することにより更なる高速化が可能であると考えている。

このように我々は JVFT 型光入力素子の開発を進め、その高周波電流応答および光パルス応答を明らかにし、JVFT が多機能・超高速光入力インターフェイスとして動作する事を明らかにした。

iv) SFQ 回路への接続と光インターフェイスとして技術の確立

実際に pin-PD を受光部として備えた光入力インターフェイスと単純な SFQ 回路とを接続し、その特性を検証した。図 39 はその回路図と素子の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、ジョセフソン伝送路(JTL)へと入力する。SFQ 信号

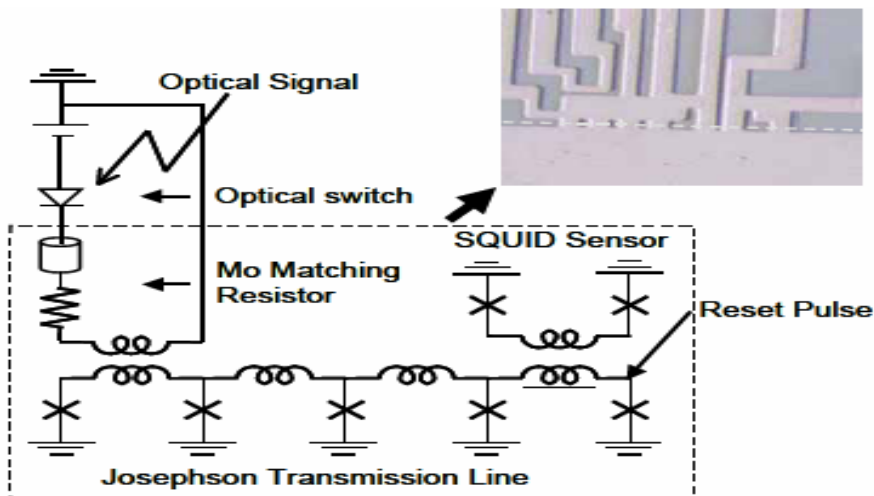


図 39 光入力回路の回路図と素子の電子顕微鏡写真

は JTL を伝播し末端の超伝導ループ内にトラップされ、隣接した SQUID センサーを用いて検出される。図 40 は繰り返し周波数 500kHz で入力したレーザーパルスのトリガー信号と SQUID の出力信号をデジタルオシロスコープで計測した結果である。トリガー信号と同期した出力信号が得られており、光入力による SFQ 回路中の磁束の生成が確認された。

以上のように、高温超伝導体を用いた光/SFQ 変換システムに関しては、フォトミキシングによる約 95GHz 動作、JFVT 型素子の光応答特性と高速性の検証、および SFQ 論理回路との接続時の動作検証等が終了し、研究目的は達成されたと考える。

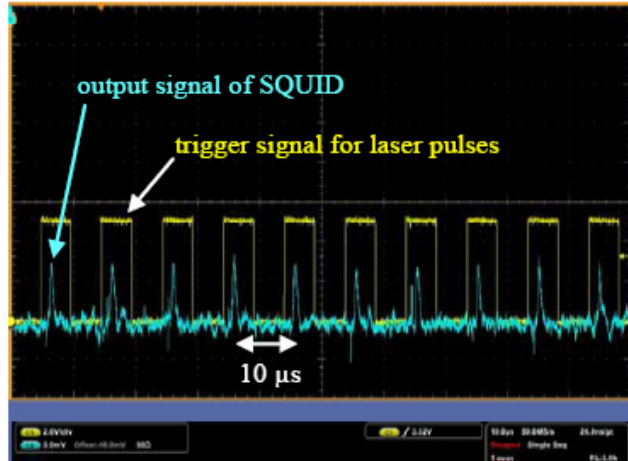


図 40 レーザーパルスのトリガー信号と SQUID の出力信号

研究実施項目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

i)磁気光学効果を用いた磁束量子の観測

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(MO)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た。図 41 は MO 効果を用いた光出力インターフェイスの概念図である。このシステムでは、超伝導ループにトラップされているもしくは伝播している SFQ 信号の磁場による MO 効果により光の偏向面が回転することを利用し、SFQ の存在の有無を光信号として取り出す。先ず我々は、静的な SFQ の検出を目的とした MO 顕微鏡の開発を行った。本システムでは光検出に CCD カメラ、光源としてケラー照明を用いて、

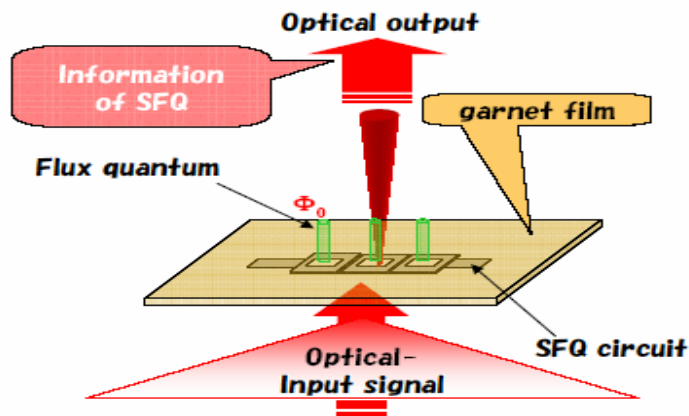


図 41 MO 効果を用いた光出力インターフェイスの概念図

超伝導体中の磁束量子の観測に必要な感度および空間分解能を達成する事を目指した。システムの構築に先立ち、MO 検出に最も重要な役割を果たすファラデー素子の開発を行った。代表的なファラデー素子として希土類ガーネットがあるが、MO 検出に最適化された高感度なファラデー素子の開発を行った。検出光の強度は、ファラデー素子の厚さが大きくなれば、ファラデー回転角が大きくなるため強くなるが、その一方で、光の吸収も増加するため小さくなっていく。よって、これらファラデー回転角と吸収の兼ね合いで最大の検出強度となるように膜厚を決定する必要がある。我々は有期金属分解(MOD)法により膜厚を制御したガーネット薄膜を GGG 単結晶基板、コーニングガラス、MgO(100)など様々な基板上に作製し、その偏光強度を計測し膜厚の最適化を行った。その結果、角基板でほぼ同等のファラデー回転能および吸収係数を持つことおよび膜厚は約 1.4 μm が最も大きな検出光強度が得られることが分かった。ただし、コーニングガラスを用いた場合は、ガーネットとの熱膨張係数の差が大きいため、薄膜作成の際の冷却過程において薄膜にクラックが入り、高分解能測定には適さないことが判明した。これらの結果で重要なことは、超伝導薄膜作成用基板として広く用いられている MgO 基板上で良好な特性を持つガーネット薄膜が作製可能であることが明らかとなったことであり、これは将来超伝導デバイスとのハイブリッド化を目指すうえで有益な情報である。

続いてこの MO 顕微鏡システムを用いて、BSCCO バルク単結晶薄片試料(超伝導臨界温度 $T_c(R=0)=82\text{K}$)に、外部磁場を結晶 c-軸方向に印加していった場合の磁束侵入の様子や、磁束分布の温度依存性および外部磁場依存性などの観測を行った。さらに特筆すべき点として、この MO 顕微鏡を用いる方法では世界で始めて高温超伝導体中の磁束量子の観測にも成功した(図 42)。また、 T_c 直下において一定の静磁場を結晶 c-軸方向に印加し、温度を降下させていった場合、マイスナー効果による磁束排除が生じるため磁束の分布状態に変化が生じることが期待される。このような状況で実験を行った結果、厚さ数 100nm 以下程度の薄片試料部においては、温度降下($T=81\text{K}$ から 67K)とともに非常に特徴的な周期構造(間隔 5–8nm)を有した磁束量子の結晶 a-軸方向の一次元配列構造が観測された。

このように、MO 効果を用いて、単一磁束量子の観測に必要な感度および空間分解能を達成すると言う目的を達成した。

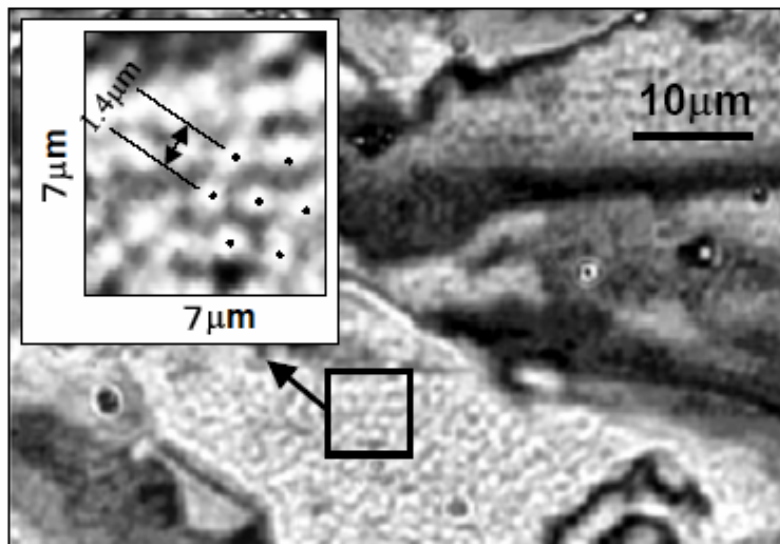


図 42 MO 顕微鏡で観測した Bi 系高温超伝導体における磁束量子

ii) 動的磁束のダイナミック観測技術の開発 FQ 光出力インターフェイスへの応用

初期型の磁気光学顕微鏡を用いて、磁束量子の観測に成功したが、これは静的な磁束量子分布であるため、光出力インターフェイスとして用いるためには、磁束の動的観測が可能なシステムを構築する必要がある。静磁場の検出では、測定時間を長くすることで SN 比を向上させることが可能であるが、動的検出の場合は短時間での測定が要求される。特に SFQ 論理回路の出力インターフェイスとしては、単一磁束量子が発生する非常に微弱な磁場を数十 GHz の速度で検出することが求められており、システムの大幅な改良が必要である。そこで、光源として Ar レーザー、増幅器として光電子増倍管を用いた磁気光学顕微鏡を新たに開発した。図 43 はシステムの概要図である。これまでのケラー照明に対して Ar レーザーを集光することによりレーザー強度は 10^4 倍程度増加する。また得られた $1\mu\text{m}$ 厚程度の膜のウェルデ定数を元に、SFQ デバイス中での単一磁束量子により偏光を受けた光成分の検出パワーを見積もったところ、光検出に光電子増倍管を用いれば十分高強度 (mA クラス) の電気信号が、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。次に空間分解能を評価するために、光信号入力実験に使用している JVFT 構造を磁気光学顕微鏡を用いて観測した。図 44 はその結果であるが、 $3\mu\text{m}$ 幅のブリッジも明瞭に観測され、その空間分解能は約 500nm で SFQ 論理回路における超伝導ループ内の磁束量子を検出するための十分な空間分解能があることが確認された。

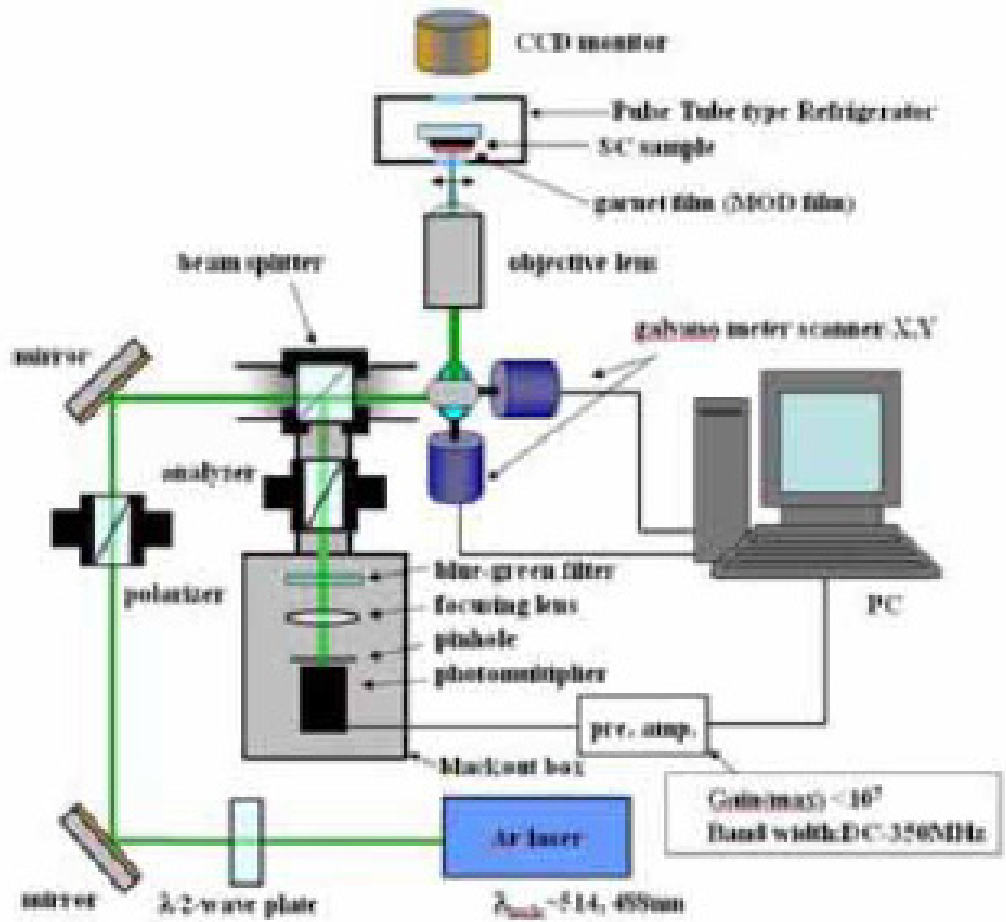


図 43 レーザー-MO 検出システムの模式図

続いて実際に超伝導デバイス中の交流磁界を本システムを用いて計測した。観測用デ

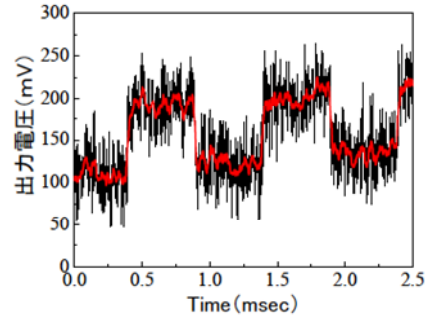
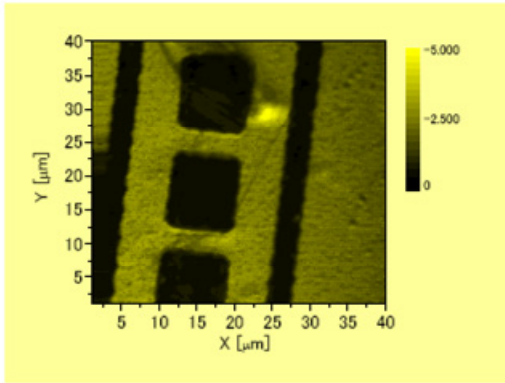


図 44 超伝導デバイスのレーザー顕微鏡写真

図 45 MO 効果により検出した超伝導
ループ中の交流磁場計測

バイスとして前述した磁束フロートランジスタ構造を YBCO 薄膜を用いて作製し、制御電流線に振幅 200mA 周波数 1kHz の方形波電流を流した。図 45 は隣接する $8\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ の超伝導ループ内にレーザーを照射し、内部の磁界の変化を磁気光学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)。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 4 個分程度と見積もられる。ただし、ノイズレベルが $70\mu\text{T}$ 程度あり、今回用いたデバイスの超伝導ループに 1 個の磁束量子が存在した磁場の約 3~4 倍程度であった。しかしながら今回の計測では、光出力インターフェイス応用を念頭に置いたものであるため、高速性を重視しこれまで行っていた SN 比改善のためのフィルタ回路の挿入、ロックイン計測および信号の積算等は全く行っていない。そのような環境で地磁気程度のノイズレベルで磁束の動的計測を実現したことは、大きな成果であると考えている。後述するように、今後直ちに単一磁束量子の MHz 領域程度の動的計測は可能であり、目標とする数十 GHz の動作についても将来的には可能であると考えている。

以上のように、我々は現状では圧倒的に高感度・高空間分解能かつ高速な MO 検出システムを構築し、超伝導デバイス中の交流磁場の検出に成功した。これは SFQ/光出力インターフェイスの構築において大きな進展である。

(2)研究成果の今後期待される効果

光入力インターフェイスの開発において、主にジョセフソン接合を用いたフォトミキシング CW 信号および極短光パルスの検出を行った。フォトミキシング光を光入力信号として利用する方法は現状では確立されていないが、チューブルな高周波信号を用意に発生させることが可能であるため、サブテラヘルツ領域の高周波デバイスに本システムを組み込み、参照信号や局部発信機などへの利用が可能である。また、ジョセフソン接合のシャピロステップを用いた周波数検出と言う手法は、光インターフェイスのみならず高周波電磁波の高速・高精度検出と言う観点からも有用であり、現在精力的に開発されているテラヘルツ波の検出システムやテラヘルツ無線通信技術等に発展させることが可能である。

一方パルス光に対応した光入力インターフェイスシステムにおいては、ジョセフソン接合への直接照射が高速動作させる上で非常に有効であることを明らかにした。我々が提案しているジョセフソン磁束フロートランジスタ型の光入力素子は、コントロール電流によりチャンネル付近の磁束密度を制御し、パルス光照射により超伝導バイアス電流を制御しているため、電流入力および光パルスの両者に独立に応答する。このような特性を利用したマルチ信号の AND および OR など簡易的な演算機能を持つ高速かつ低消費電力の機能性光入力素子として利用可能であると考えている。

MO 検出器を用いた光出力インターフェイスに関する研究では、世界最高レベルの高速かつ高感度なシステムの開発に成功している。現状でもノイズレベルが地磁気程度で kHz 領域の周波数に対応した磁場検出システムを実現しており、MHz 領域までの高速検出に対応している。しかしながら将来的な目標である SFQ の光出力として利用するためには、数十 GHz かそれ以上の周波数での動作が要求される。MO 効果による磁場変化の検出時間分解能は、原理的には MO センサーであるガーネットのスピンの緩和時間により制限され、これは数 ps 程度であり原理的には百 GHz を超える高速応答が可能である。現在のシステムで実際に検出速度を制限しているのは、MO 変調された検出光を受光し増幅している光電子増倍管およびその出力をさらに増幅している電流アンプの動作帯域である。現在用いている光電子増倍管は 1ns 程度の応答速度であるので帯域としては数百 MHz 程度となるが、これを高速なフォトダイオードに取り替えることにより百 GHz 程度まで改善することが出来る。ただし、フォトダイオードは感度が 3 桁程度落ちるので、他の部分で対処する必要がある。1つは光源に使用しているレーザー光の波長を変えることである。現在使用している波長 514nm の Ar レーザーから光通信帯域波長である 1.5 μ m のものに変更すると、レーザーの透過率が格段に上がり、1~2 桁の特性改善となる。また、デバイスの構造を微細化し、より小さなループに SFQ 信号を閉じ込めることにより磁束密度を高めることが出来る。現愛我々の実験では 8 μ m x 10 μ m のループに入った磁束を検出したが、1~2 μ m 角程度のループにすることにより 1 桁以上磁束密度を高めることが可能である。この様に、システムおよびデバイス構造を改善することにより、将来的には SFQ 回路の光出力インターフェイスとして十分機能できる高速動作が達成可能であると考えている。

3.3 高温超伝導体ジョセフソン接合の基礎(東京大学 前田グループ)

中間報告書で記載したとおり、本研究グループでは当初計画にあった 2 つの実施項目(「高温超伝導体接合の伝導特性解析」、「ナノブリッジ内ボルテックスの挙動解析」)に加え、新たに 3 つ目に実施項目「固有ジョセフソン接合の特性解析」を設け研究にあたった。まず、申請時に設定した目標と達成状況、その他特記事項として全体をまとめる。その後、実施項目ごとに、研究実施内容及び成果を記載する。

項目	開発目標	達成状況	達成度自己評価 (5段階)
高温超伝導体接合の伝導特性解析 (1)接合特性評価 (2)理論的研究 (3)新理論によるデータ解釈と $I_c R_n$ 積向上にむけての提言	高温超伝導体ジョセフソン接合の小さな $I_c R_n$ 積の原因を特定し、大きな $I_c R_n$ 積を持つ接合作製に向けての提言を行う。	(1)キャリア数を変化させて接合を作製することで、ジョセフソン接合形成に最適なキャリア数が把握された。また、交流伝導度測定による超伝導ゆらぎの研究が大きく発展し、同じく、接合作製のための最良のキャリア数についての情報も得た。(2)別項に記したように、数多くの成果が得られた。(3) (1)(2)の結果をもとにグループ間で議論し、HTS 接合の特性は障壁層の両端に拡散金属層があるモデルで理解できると推察するに至った。そのモデルに基づく理論計算は、種々の実験データを定量的に説明することができる。	5
ナノブリッジ内ボルテックスの挙動解析 (1)ナノブリッジでのボルテックスの挙動理解 (2)テラヘルツ特性評価 (3)高速動作に向けての提言	ナノブリッジの作製と磁束量子のダイナミクスの研究を行い、高速動作にむけての提言を行う。	本項目全体は、研究途中から近畿大学 G に委託した。しかしながら、上記項目の研究結果を踏まえて高 $I_c R_n$ 積 HTS ジョセフソン接合は絶縁膜の形成を排除する必要があると考え、磁性体を利用したブリッジタイプの接合を新たに提案した。実際の試料において $I_c R_n$ 積向上のポテンシャルが示された。これに関しては特許出願済である。	4
固有ジョセフソン接合の特性解析 (当初計画にはなかった内容)	銅酸化物超伝導体固有接合を作成し、特性評価を行う。特に高温動作量子ビットを実現させる。	量子ビット実現にまでは至っていないが、様々なタイプのジョセフソン接合で巨視的量子トンネルの実現に成功した。様々なタイプでの実現は我々が初めてである。	4
その他特記事項	<ul style="list-style-type: none"> 第一項目内では、当初の計画にはなかった「交流伝導度測定による超伝導ゆらぎの研究」が非常に進展した。 第二項目内では、当初の計画にはなかった「ブリッジタイプの 		

	<p>ジョセフソン接合の作製と特性評価」が非常に進展したが、これは第一項目の研究結果の果たした役割が非常に大きい。</p> <ul style="list-style-type: none"> • 様々な局面で、グループ間の共同研究が研究の進捗に関して大変大きな役割を果たしたということは特筆されるべきことである。CREST 型研究の利点がいまよく発揮されたものと信ずる。
--	---

(1)研究実施内容及び成果

①研究計画(当初)

当初は以下のような計画を立てて本研究がスタートした。

[項目1]高温超伝導ジョセフソン接合の基礎特性の研究

(意義・目的)高温超伝導体ジョセフソン接合では現在十分な性能が得られておらず、高温超伝導体ジョセフソン接合の基礎特性を改めてじっくり研究することが不可欠である。

(目標)高温超伝導体ジョセフソン接合の基礎特性を実験・理論両面から完全に理解し、その結果に基づき、接合の $I_c R_n$ 積向上についての提言を行う。

[項目2]高温超伝導体ナノブリッジ中の磁束量子の挙動の研究

(意義・目的)超高速超伝導デバイスの中でも、フラックスフロートランジスタ等の動作特性を制御・向上させるためには、高温超伝導体ナノブリッジ中の磁束量子の挙動の解明が不可欠である。

(目標)高温超伝導体でナノブリッジを作成し、ナノブリッジ中の磁束量子の挙動を解明し、超高速動作への指針を得る。

②研究実施方法(スタート時点)

上記項目に対して以下の内容で研究実施を開始した。

(1-1) 接合特性評価

パルスレーザー蒸着(PLD)法で作成した高温超伝導体良質薄膜にジョセフソン接合を作製し、電流-電圧特性を温度の関数として測定し、接合の諸パラメータと特性の関連を整理する。特に、キャリア密度を変化させて系統的に接合特性を調べることが重要である。このために、PLD装置一式をあらたに導入した。また、装置稼動のためポスドク研究員を雇用した。

(1-2) 理論的研究

高温超伝導体ジョセフソン効果の理論的研究:高温超伝導体の特徴(超伝導波動関数が異方的(d波的)であることや、超伝導が擬二次元的であること)などの影響がジョセフソン効果にどのように現れているか、理論的側面から調べる。

(1-3) 新理論によるデータ解釈と $I_c R_n$ 積向上に向けての提言

ここで構築した新理論を用いて、(1-1)で蓄積した高温超伝導体のジョセフソン接合のデータを精密に解析し、高温超伝導体ジョセフソン接合の物理学の基礎を理解する。以上の研究結果に基づき、高温超伝導体接合に特徴的な小さい $I_c R_n$ 積の起源を再考し、 $I_c R_n$ 積向上に対する具体的提言を行う。

(2-1) ナノブリッジでのボルテックスの挙動理解

まず、バルク試料で、高温超伝導体磁束量子(ボルテックス)の挙動を理解する。このため、マイクロ波を用いてボルテックスの粘性係数の測定や、ノイズを利用した動的相図の研究を行う。次に同様の手法でナノブリッジ内のボルテックスの挙動を調べ、バルクのそれと比較する。

(2-2) テラヘルツ特性研究

テラヘルツ(THz)でのナノブリッジや接合の応答を測定するシステムを構築し、応答を調べる。加えて、高温超伝導体接合の交流特性をTHz領域まで調べて、超高速応答に関

する知見を得る。

(2-3) 高速動作にむけての提言

以上の結果に基づき、例えば、ナノブリッジフラックスフロートランジスタや SFQ デバイスの高速化・高性能化についての具体的指針を与える。

以下に当初計画の線表を示す。

項目	平成 14 年度 (5ヶ月)	平成 15 年度	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度 (7ヶ月)
(1) 高温超伝導体接合の 伝導特性解析		←				→
(1-1)接合特性評価		←				→
(1-2)理論的研究		←				→
(1-3)新理論によるデータ 解釈と $I_c R_n$ 積向上に向け ての提言				←		→
(2) ナノブリッジ内ホルテックス の挙動解析			←			→
(2-1)ナノブリッジでのボル テックスの挙動理解			←			→
(2-2)テラヘルツ 特性研究				←		→
(2-3) 高速動作にむけて の提言					←	→
(3)固有ジョセフソン 接合の特性解析	当初計画に無かった新規研究内容である。					
			←			→

③中間報告・評価時点での研究計画の見直し

薄膜の評価手段の一環として構築した、周波数を連続的に変化させてマイクロ波領域の交流伝導度を測定する装置が非常に良好であり、超伝導の揺らぎによる伝導度を高精度で測定できるようになった。これにより、超伝導転移そのものの性質を的確に理解できるようになり、微視的超伝導発現メカニズム、ひいては本研究の目的である高温超伝導体のジョセフソン効果の的確な理解に対して大きな助けとなると考え、この研究も本格的に推進した。現在さらに、テラヘルツでの伝導度測定が可能なシステムを構築中である。なお、マイクロ波領域の伝導度測定を通し、新たな非破壊の高周波誘電率測定システムを開発した。この手法のニーズは高く、現在も改良を続けている。

これに関連して、当初計画していたナノブリッジ作成は当グループでは手が回らなくなり、途中からあらたに研究チームに参加した近畿大学楠グループが担当することになった。

一方、ランプエッジ接合を作成・評価する研究では諸事情により当初予想していたような進捗が得られず、また、理論解析からも、汚れた金属層の形成を回避できない限り、この方法によるこれ以上の特性の飛躍的な向上は期待できないということがわかってきた。そこで、新たな発想で、接合を作製する必要に迫られてきた。このような背景のもと、酸化物絶縁層の作製の必要のない、磁性体を利用した新たな、再現性の良いジョセフソン接合作成プロセスを考案し、作成・特性評価をおこなった。最近、この方法によるジョセフソン接合作製において、一定の成果が得られつつある。こちらはすでに、特許出願をおこない、論文も準備中である。

また、人工的にジョセフソン接合を作成することとなり、固有接合を利用した量子ピット開発の研究もスタートさせた。

④研究結果

1) 薄膜試料の超伝導特性評価

パルスレーザー蒸着 (PLD) 法の薄膜作成装置を導入・作製し、同装置で高温超伝導体薄膜を作製し、評価を行った。具体的には、キャリアドーパ量を変化させて接合特性を調べること大きな目的の一つとしたので、LSCO 系に注目した。そして、これらの試料を用いて、以下で述べるような接合を作製した。

2) LSCO 系, NCCO 系の超伝導ゆらぎ測定による電子相図の研究

高温超伝導発見 20 年を経過した今なお、だれもが、「発見メカニズムについては確立していない」という。我々は、複素交流伝導度の精密かつ系統的測定から超伝導揺らぎ研究という比較的オーソドックスなトピックスを同物質系に適用することによりこの懸案事項について新たなメッセージを発信できるのではないかと期待のもとに本研究を開始した。その結果、当初の予想を超える多くの情報を得ることができた。なお、この部分に関しては、さらに高品質の薄膜作製が可能な高純度オゾンをもちいた MBE 法で作製した薄膜を、電力中央研究所塚田一郎博士 (LSCO)・東京農工大内藤方夫教授・東田昭雄博士 (NCCO) より提供していただいた。

(a) ホールドーパ系 LSCO 不足ドーパの試料 ($x \leq 0.14$) では、超伝導揺らぎは 2 次元 XY 的 (BKT 的) であり、位相の揺らぎが T_c 以上の広い領域で支配的である。我々の手法では、超伝導揺らぎは、高々 T_c の 2 倍程度の温度以下で観測される。これに対してプリンストン大学のグループのネルンスト効果測定、あるいは反磁化測定では、それよりはるかに高い温度から「超伝導の揺らぎ」とされる信号が報告されており、定量性については一致を見ていない。ネルンスト信号の解釈の問題なのか、それとも超伝導揺らぎ測定の感度の問題なのか、統一の見解は得られていない。また、最近ブリティッシュコロンビア大学のグループが不足ドーパ YBCO で超流体密度の温度依存性の測定 (@5 GHz) を行い、BKT 的な兆候は一切見られないと主張しているが、彼らの測定は周波数一点での温度依存性測定であり、また我々の測定でも数 GHz では BKT 的な「とび」も極めて見えにくくなる。BKT 的振舞いは複数の周波数での超流体密度の温度依存性を比較して初めて観測される。異なる空洞共振器を複数用いてデータを比較する手法では、これは実質的に不可能であり、この意味でも我々の手法は強力であり、その特徴が生かされている。

(b) 最適ドーパ試料 ($0.15 \leq x \leq 0.17$) では、超伝導揺らぎは 3 次元 XY 的であり、不足ドーパの 2 次元 XY 的振舞いからの移り変わりは非常に急激である。磁場効果を調べることで独立なチェックが可能であるが、その結果も 3 次元 XY 的揺らぎと整合する。最適ドーパ試料に関しては、ブリティッシュコロンビア大学のグループが YBCO 系での超流体密度の温度依存性測定から、やはり超伝導揺らぎは 3 次元 XY 的であると結論している。

(c) 過剰ドーパ試料 ($0.18 \leq x$) では、動的スケーリング解析の結果は 2 次元的な超伝導揺らぎを示唆するが、磁場効果の測定も含めて得られた臨界指数の値はよく知られているいずれのモデルのそれとも一致しない (「2 次元 unknown」)。過剰ドーパ試料に関しては、一般に乱れの効果が激しいと言われている。全てのデータは相分離の考え方で説明できると主張する研究者もいるほどであり、試料の乱れ、不均一性などがどのように超伝導揺らぎデータに反映されるかチェックを要する。これに関しては、従来超伝

導体 NbN(名古屋大学藤巻朗教授より提供を受ける)などを用いて、意図的に T_c を分布させた試料で測定を行いながら検討した。それによると、 T_c に分布がある場合には、超伝導揺らぎデータは決してスケールせず、通常のスケーリング則を満たす場合とは質的に異なる結果が得られた。一方、理論的にもXYモデルに種々の拡張を行うと、多種多様な臨界的振舞いが得られるようである。過剰ドーピングの「2次元 unknown」の振舞いの理解については、今後の理論的発展にも期待したい。

(d)電子ドーピング超伝導体 LCCO:高温超伝導の発現機構を理解する上で鍵となるとしばしば言われてきたのが電子ドーピング銅酸化物超伝導体である。最近ようやく電子ドーピング超伝導体(最適ドーピングよりやや不足ドーピング側)についてもデータが取れるようになり、超伝導揺らぎは3次元 XY 的であることが判明した。詳細なキャリア濃度依存性やホールドーピング系との比較は今後の課題である。

(e)ホールドーピング系で観測された不足ドーピング・最適ドーピング間の急激な次元交差は、キャリア濃度の増大に伴う異方性の変化だけでは決して説明できない振舞いである。実験的にほぼ確立しつつある過剰ドーピング領域の2次元的揺らぎも含めて、超伝導揺らぎはキャリア濃度に強く依存して変化しており、電子相図に関しては、転移温度や擬ギャップの振舞いだけでなく超伝導揺らぎの振舞いも理論的に説明される必要がある。3次元 XY 的ゆらぎが最適ドーピング近傍のごく限られた組成領域だけで観測されるということは、すでに存在が確率している2つの量子臨界点に加えて「隠れた」量子臨界点とその近傍での大きな量子ゆらぎの存在と関連していると言えるかもしれない。また、乱れがある場合の臨界現象については理論的にも未解明の部分が多いので、今後この方面の研究の進展がこの問題の棺の蓋をするのに決定的に重要であろう。

3)ランプエッジ接合を用いた研究

(a)これまでランプエッジ接合に関して、図 46 のようなデータが、**非常に一般的に**得られることが明らかになっていった。その特徴は、(i)従来の(低温)超伝導体に対して知られている、臨界電流 I_c の温度依存性とは異なる I_c の温度依存性がえられる。(ii) $I_c R_n$ 積は、2mV程度であり、高温超伝導体の理想値の1/10以下である。(iii)TEMを用いた界面観察でも、明確なバリアの存在が確認できない。

これを理論的に解釈すると、トンネル障壁と高温超伝導体の間に、(汚れた)金属があるという場合に該当すると推察される。この考えに基づき、具体的に理論的解析を行った結果、(汚れた)金属層の存在によって、確かに、 $I_c R_n$ 積が急激に減少することがわかった。理論解析の詳細は、後ほど別項を設けて記述する。

(b) $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) - YBCO のランプエッジ接合(図 47)を作製し、電流-電圧特性を調べた。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

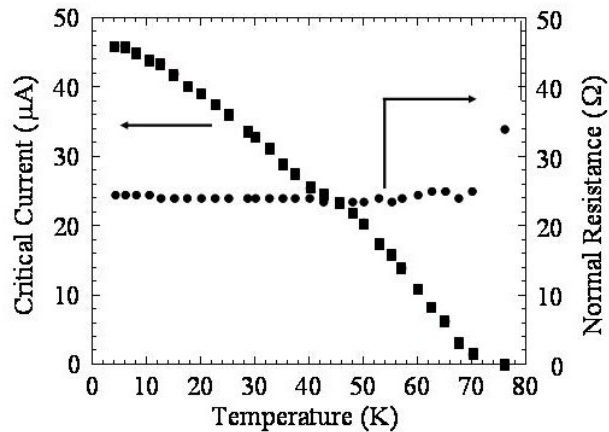


図 46 ランプエッジ接合の臨界電流および常伝導抵抗の温度依存性

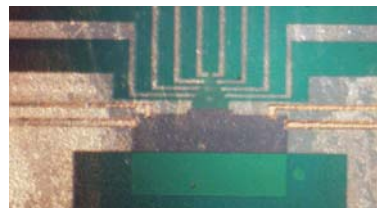


図 47 作成ランプエッジ接合を上から見た図

うな接合を過剰ドーピングの試料に対して作製することに成功した。これはこの種の接合では決して得られていなかった結果であり、今後、LSCO のキャリア密度を変化させることにより、高温超伝導体のトンネル障壁について、新たな視点が得られることを強く期待させる。種々の他の測定結果との突合せから、過剰ドーピング試料に作製された接合部分は実質的に最適ドーピングになっていることを示唆しており、したがって、この結果は、接合作製は最適ドーピング試料をベースにして行うのが最良であるということを示唆している。

4) 新しい簡易ジョセフソン接合の作製

上述のランプエッジ接合は、積層型接合とならび、高温超伝導体で色々と試みられた結果生き残っている数少ない、(相対的には)もっとも良質の接合が再現性よくできるとされている方法であるが、それでも、上述のように、酸化絶縁バリアーを作製することにより、接合部の界面の様子が乱されてしまい、高温超伝導体のもつポテンシャルを全く引き出せないという状況になっている。このことは、上述のように理論解析によっても裏付けられてしまった。そこで、我々は、酸化絶縁バリアーを作製しないで済む新しい接合作製方法を提案し、 $I_c R_n$ 積の大きな接合を作製することを試みた。具体的には、図 48・49 のように、高温超伝導体ストリップ上に磁性金属である鉄の小さなアイランドを蒸着し、磁性体の持つ磁性で超伝導を破壊することにより、ジョセフソン接合を実現しようという考えである。

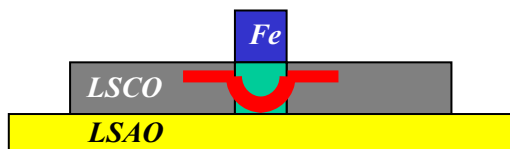


図 48 鉄の磁性を利用したブリッジ型ジョセフソン接合の模式図

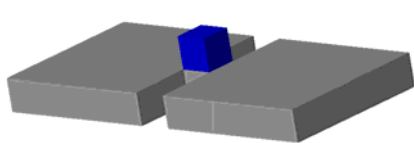


図 49 新しいブリッジ型接合の鳥瞰図

図 50 は鉄の小さなアイランドを載せたブリッジの電流－電圧特定で、ジョセフソン接合 (SNS) 的な電流電圧特性が見えている。

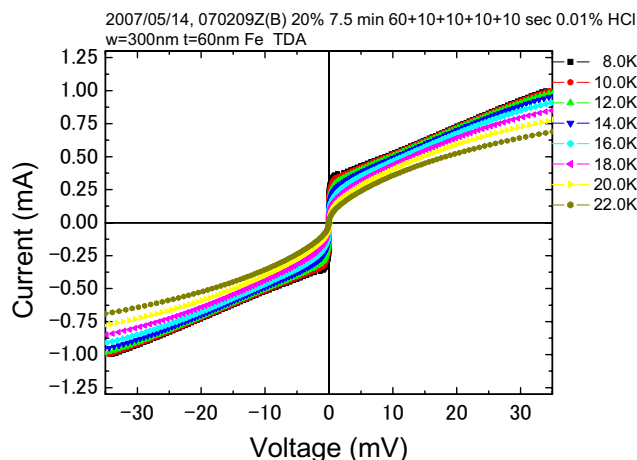


図 50 ブリッジ型ジョセフソン接合の電流－電圧特性

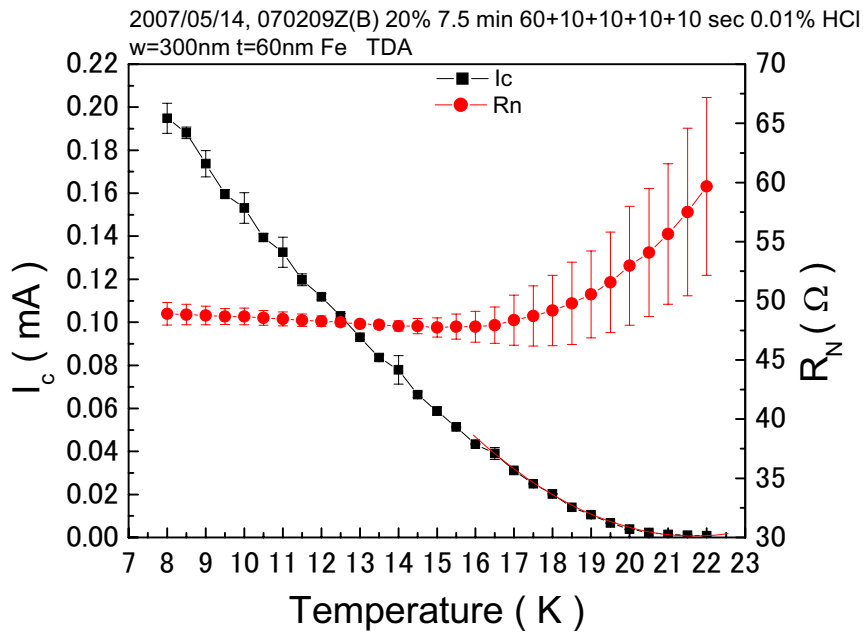


図 51 新しいブリッジ型接合の臨界電流および常伝導抵抗の温度依存性

その臨界電流の温度依存性や「常伝導抵抗」の温度依存性は図51のようになり、下凸の温度依存性は SNS 接合が形成されていることを示唆し、温度によらない常伝導抵抗も、抵抗の大部分がいわゆるフラックスフローによるものではないことが示されている。このデータの場合、 $I_c R_n$ 値は5mV とかなり大きく、新たな簡便法が高温超伝導ジョセフソン接合作製に有効であることを示唆している。

比較実験として、鉄の代わりに銅を用いると、これらとは全く異なる振舞い(超伝導ストリップでのフラックスフロー)が得られ、これらの特性が出現するためには鉄イオンの存在が重要であることが確認された。

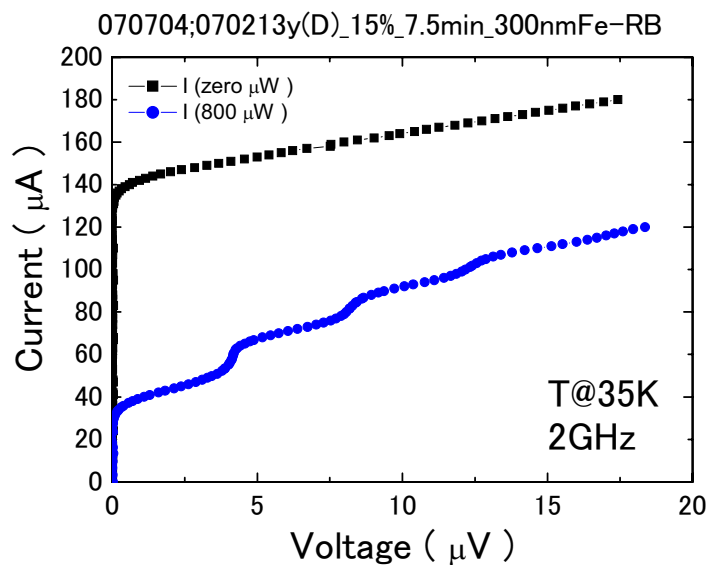


図 52 新しいブリッジ型接合の電流電圧特性に対するマイクロ波照射効果

さらに、得られた特性がジョセフソン効果によるものであることを確認するために、マイクロ波を照射して干渉効果の検出を試みた。

図 52 のように、マイクロ波による干渉効果が観測され、さらにその振幅依存性を測定して理論によるフィッティングを試みた結果(図 53)、臨界電流の電圧の大部分がジョセフソン効果によるものであることも示された。

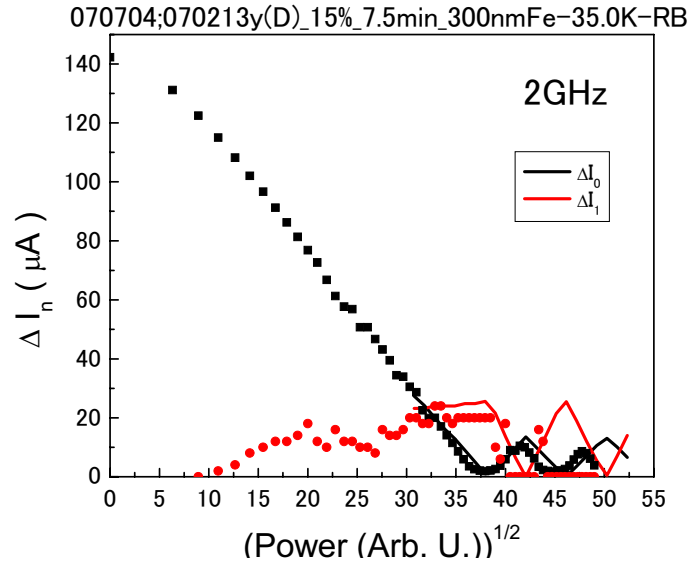


図 53 マイクロ波照射効果のマイクロ振幅依存性。実線は理論計算による予測

以上のように、新たな簡便法はジョセフソン接合作製の有望な手段となることが示されつつあるが、さらに、SFQ 素子としての応用を念頭において、磁束量子一本一本が接合をまたいで運動していることを簡潔に示すために SQUID 構造の作製を試みた。

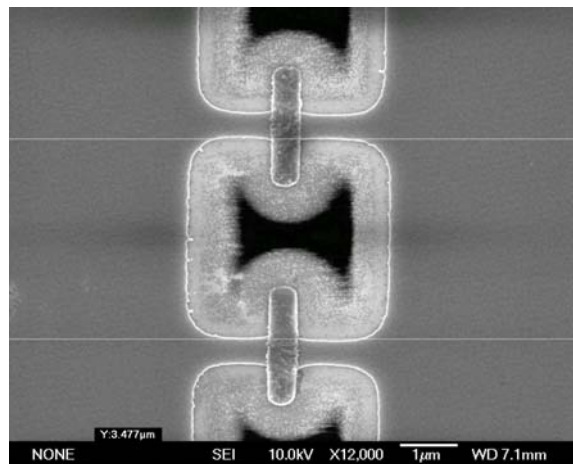


図 54 LSCO で作成した新ブリッジ接合を用いた SQUID 構造の顕微鏡写真

図 54 のような RF-SQUID 構造を作製し、電圧が磁場によって周期的に変動するか否かを調べたところ、磁場－電圧特性には明確な振動構造は見られないが、そのフーリエ変換

には対応する周期成分が現れていることがわかった。現在、この特性のさらなる向上に取り組んでいる。

以上の成果は、既に特許出願されている(国内2件, PCT 出願 1 件)。

5) 固有接合の作製と評価(量子ビットへ向けて)

接合の良質性という観点から BSCCO 系の固有接合(結晶構造自体がジョセフソン接合アレーを形成している)にも注目し, 同物質単結晶でメサ構造, さらに S 字型構造を作成し評価した。試行錯誤の結果, メサ構造, S 字型構造のいずれにおいても, 巨視的量子トンネル現象を確認できる段階まで到達した。すなわち, 電流-電圧特性を測定したところ, ヒステリシスを伴ったジャンプが観測された。一つのジャンプに注目して, 臨界電流の統計的分布を実験的にもとめたところ, 分布の広がり, 約1Kまでは, 熱活性化型になったが, それ以下の温度では, 温度に依存せず, 分布の大きさそのものも巨視的量子トンネル効果にたいして予想される理論計算とよく一致している。今後, マイクロ波との結合などの実験を行い, 量子ビットの実現に向けて研究を続ける予定である。

6) 銅酸化物超伝導体ジョセフソン接合の理論的研究

一部は既に述べたが, 上述の実験研究に並行して, 銅酸化物超伝導体を念頭においたジョセフソン効果の理論的研究も精力的に展開した。

(3-1)汚れた金属層の効果

銅酸化物超伝導体接合の両端に汚れた金属層があるようなジョセフソン接合の電流の温度依存性に関して理論計算を行った。その結果 $I_c R_n$ 積が大きくなる理由として, 超伝導体界面に形成される拡散伝導領域が深刻な影響を与えるということを明らかにした。

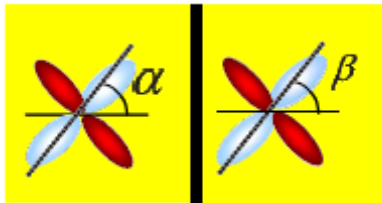


図 55 d波超伝導体ジョセフソン接合での波動関数の位相関係

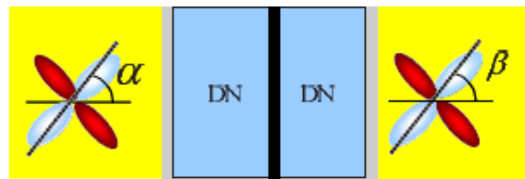


図 56 拡散金属層を有するジョセフソン接合の模式図

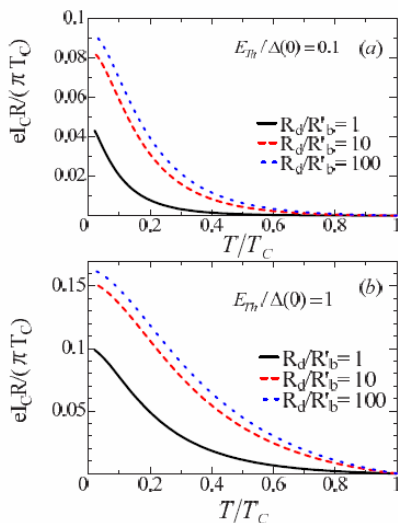


図 57 図 56 の構造に対して計算した臨界電流の温度依存性

銅酸化物超伝導体接合のモデルとして拡散伝導領域(DN)を界面に仮定して(図 55・56), Usadel 方程式を解くことでジョセフソン電流の大きさを求めた。

ここで E_{Th} はサウレスエネルギーと呼ばれる量で DN の長さを L としたときに D/L^2 (プランク定数 1 とした) と与えられる量で, R_d は拡散伝導領域の抵抗, R'_b は DN と d波の間にできた界面抵抗, R_b は中央の絶縁体を介した場所での界面抵抗である。 R_N は $R_N = R_d + R_b + R'_b$ で与えられる。

ここでは $\alpha = \beta = 0$ が成り立つともに 100 配向の接合を考えた。この図からもわかるように, 拡散伝導領域の抵抗の値が大きくなると, その結果として, $I_c R_n$ 積は小さくなる。 E_{Th} が値が小さくなるということは DN の領域が短くなることを意味しており, そのためには理想的な接合(DN)の値が小さい接合が作成されなければ $I_c R_n$ 積は大きくならないことを意味する(図 57)。

また銅酸化物接合における新奇なジョセフソン電流の

温度依存性も予言した。銅酸化物超伝導体と拡散伝導領域の接合では、アンドレーエフ共鳴状態が形成されるときには、近接効果が抑制されることが知られている。この点を考慮した計算を行った。その結果 α , β の値に依存して非単調な温度依存性が現れることが明らかになった。

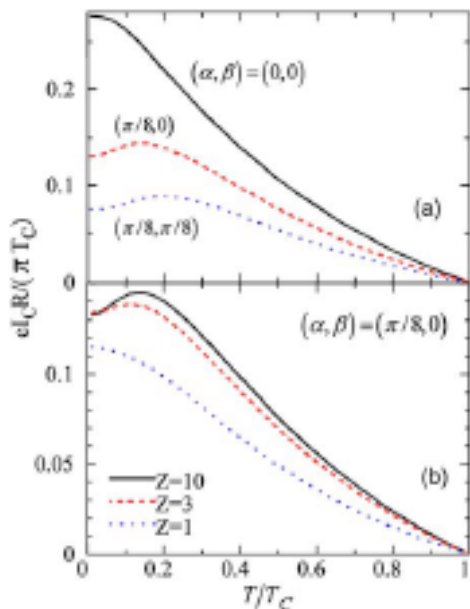


図 58 様々な波動関数の相対角度に対する臨界電流の温度依存性

我々になじみのあるクーパーペアは、時間の交換(松原周波数)に関しては偶関数の、偶周波数スピン1重項偶パリティ(ESE)ペアと偶周波数スピン3重項奇パリティ(ETO)ペアであるが、さらに奇周波数スピン3重項偶パリティ(OTE)ペアと奇周波数スピン1重項奇パリティ(OSO)ペアが存在することも原理的には許される(表1参照)。

30年ほど前に、Berezinskii はOTE状態がヘリウム3で実現されないかという提案を行った。しかし、実験とは相容れず、ヘリウム3の超伝導の対称性は、ETO状態(スピン3重項p波)であることが確立している。

最近我々は、より一般的に奇周波数電子対が超伝導不均一系において遍く存在することを理論的に解明した。特に常伝導・超伝導接合における近接効果につ

いて、準古典 Green 関数の方法を用いて、超伝導体に隣接した常伝導体が弾道伝導領域にある場合と拡散伝導領域にある場合に関して、奇周波数ペアが透過率に依存してどのように誘起されるかを系統的に明らかにした。得られた結果の要約として、超伝導体として偶周波数のESEあるいはETO状態を仮定し、これらの超伝導体と常伝導体金属の接合において、界面に形成されるペアと近接効果により誘起されたペアの対称性の対応を表2にまとめた。界面での透過率が低い極限でも残るものを太字で、また透過率が有限になる

図 58 で、 Z は界面でのバリアーの高さを無次元化したパラメータである。 Z が 0 のときは理想的な透過率1の界面で Z が大きくなると透過率は低くなる。また α あるいは β が $\pi/4$ になると近接効果が消失するために、ジョセフソン効果はなくなる。この点は、バリスティック接合と異なる点である。図からもわかるように α あるいは β が $\pi/8$ になっているときに非単調な温度依存性が得られる。

この結果は田仲柏谷が10年前に理論的に予言し(Phys. Rev. B 56 892 (1997)), 後に Testaらによって検証されたのとはまた違う新しい起源によるものである。我々はまた、Sigrist-Rice 現象論的公式がどのような場合に成立するかを確かにした。

(6-2) 超伝導接合とクーパー対の対称性

超伝導のクーパーペアの波動関数は、パウリの原理に基づき2電子の交換に関して反対称でなくてはならない。電子スピンの交換に関して反対称のものをシングレット、対称のものをトリプレット、座標の交換に関して対称のものを偶パリティ(s波d波など)反対称のものを奇パリティ(p波など)と呼ぶ。

表 1 様々な可能な超伝導の対称性

+ symmetric, - anti-symmetric

	Matsubara Frequency	Spin	Orbital	Total
ESE	+	-	+	-
ETO	+	+	-	-
OTE	-	+	+	-
OSO	-	-	-	-

と現れる対称性を括弧内に記した。超伝導体が p_x 波や d_{xy} 波の場合には、界面で準粒子が反射(通常の反射)されるときにペアポテンシャルの符号変化の効果が現れるが、これも表に明記した。

まず界面状態に関しては符号変化と奇周波数の間に密接な相関があり、この符号変化が存在する(2)および(3)の場合には、特に界面の透過率が低い極限では奇周波数状態しか存在しないことがわかる。すでに過去の研究から符号変化がある場合には界面にアンドレーエフ共鳴状態と呼ばれる異方的超伝導固有の共鳴状態が形成されることが知られており、今回の解析はアンドレーエフ共鳴状態が奇周波数のクーパーペアの状態であることに対応する。つまり過去の銅酸化物超伝導体の実験においてゼロバイアスピークが観察されていたことは、直接奇周波数ペアの存在を検出したと解釈しなおすことができる。一方ゼロエネルギーピークが現れない(1)や(4)の状態であっても、透過率が大きい界面においては奇周波数の成分が現れることが明らかとなったが、この奇周波数ペア振幅は透過率の低下とともに消失し、孤立した超伝導体の界面では現れない。

次に近接効果に関しては、超伝導体に隣接する常伝導体が、拡散伝導領域(DN)にある場合を考えた。常伝導体中に存在できるペアは不純物散乱のために偶パリティのs波のみである。(1)の場合にはESE状態のs波、(3)の場合はOTE状態のs波がDN領域に誘起される。(1)の場合にはDN領域の準粒子状態密度はエネルギーギャップを持ち、通常によく知られた近接効果状態に対応するが、(3)の場合はアンドレーエフ共鳴状態が常伝導体に浸入するために、誘起された近接効果状態は本質的にギャップレスで、その結果得られる状態密度はゼロエネルギーピークを持ち、偶周波数状態の超伝導体が奇周波数ペアをDN領域に誘起するという新奇な近接効果である。一方(2)と(4)の場合は、s波の成分が存在しないためにDN領域への近接効果は現れない。特に(2)のスピンの1重項の d_{xy} 波においては、アンドレーエフ共鳴状態が現れるが、界面で形成される奇周波数ペアは奇パリティのために、DN領域には侵入できない。

表 2 近接効果と超伝導対称性

	Bulk state	Sign change	Interface-induced state (subdominant)	Proximity into DN
(1)	ESE (s-wave)	No	ESE + (OSO)	ESE
(2)	ESE (d_{xy} -wave)	Yes	OSO + (ESE)	No
(3)	ETO (p_x -wave)	Yes	OTE + (ETO)	OTE
(4)	ETO (p_y -wave)	No	ETO + (OTE)	No

(2)研究成果の今後期待される効果

超伝導ゆらぎ測定による、銅酸化物超伝導体の電子相図を議論した研究により、高温超伝導体の超伝導揺らぎに関して非常に信頼性の高いデータがドーピングの関数として系統的に得られたことは高温超伝導コミュニティに対する大きな貢献であると信ずる。もう少しインピーダンスをあげることでできる物質であれば、測定周波数の上限をさらに上げることが可能であり、最近人気の、マルチフェロイクス物性や巨大応答などの物理にも本質的な貢献ができるであろうと確信する。

一方、キャリアドーピングを変化させてランプエッジ接合を作製し、その特性を評価したことにより、この方法の限界を知ることができ、かつ、接合を作製する際の最適ドープ組成を知ることができたので、当初の研究目的の一つが達成されたことになる。また、理論的にも、

何故銅酸化物超伝導体のジョセフソン接合では $I_c R_n$ 積が大きなものの実現が難しいのかに関して、一定の解等を与えることができたと考えている。

そして、その知見に基づき、最適ドーピング組成に的を絞り、新しい発想で、簡便接合を作製する試みが上手く行きつつあり、 $I_c R_n$ の大きな接合も得られつつある。再現性の向上に関してさらに研究を継続することにより、将来的に、高性能の高温超伝導体ジョセフソン接合を作製する可能性が開かれたため、この研究の意義は極めて大きい。

また、副産物として、(先行グループに次いで)固有接合でも巨視的量子トンネル現象が観測されたことにより、高温超伝導体のジョセフソン接合を利用した量子ビット実現に対して具体的道筋が開かれたことになり、ソリッド・ステート量子ビットの動作温度も飛躍的に向上する可能性が出てきた。

4 研究参加者

①HTS接合グループ(高温超伝導積層構造ジョセフソン接合とナノブリッジの研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
藤巻朗	名古屋大学	教授	接合開発とまとめ	平成14年11月～ 平成20年3月
井上真澄	名古屋大学	講師	元素添加薄膜作製	平成14年11月～ 平成20年3月
赤池宏之	名古屋大学	助教	微細加工プロセス	平成16年4月～ 平成20年3月
吉永康之	名古屋大学	博士課程 終了	積層接合プロセス評価	平成14年11月～ 平成16年3月
脇田和弥	名古屋大学	修士課程 終了	元素添加薄膜作製	平成14年11月～ 平成16年3月
内藤利光	名古屋大学	修士課程 終了	積層接合プロセス評価	平成14年11月～ 平成16年3月
石川義人	名古屋大学	修士課程 終了	ランプエッジ接合と比較	平成14年11月～ 平成16年3月
谷池浩一郎	名古屋大学	修士課程 終了	元素添加積層接合	平成15年4月～ 平成17年3月
宮口哲	名古屋大学	修士課程 終了	薄膜形成プロセス評価	平成15年4月～ 平成17年3月
木村大至	名古屋大学	博士課程 2年	積層接合・二重接合	平成16年4月～ 平成20年3月
西谷崇	名古屋大学	修士課程 終了	細線とランプエッジ接合	平成16年4月～ 平成18年3月
深井由高	名古屋大学	修士課程 終了	光入力回路	平成17年4月～ 平成19年3月
杉本学	名古屋大学	修士課程 終了	ナノブリッジの作製	平成17年4月～ 平成19年3月
梶野顕明	名古屋大学	修士課程 2年	ナノブリッジ・光出力	平成18年4月～ 平成20年3月
渡邊光弘	名古屋大学	修士課程 1年	積層接合・TFF	平成19年4月～ 平成20年3月
堀井佑樹	名古屋大学	修士課程 1年	光入力回路	平成19年5月～ 平成20年3月
楠正暢	近畿大学	准教授	プロセス開発	平成17年4月～ 平成20年3月
八田和己	近畿大学	修士課程 終了	超伝導特性の評価	平成17年4月～ 平成19年3月
太田真輔	近畿大学	修士課程 2年	EBリソグラフィ	平成17年10月～ 平成19年3月
入谷安代	名古屋大学	チーム 事務員	事務処理	平成16年2月～ 平成20年3月

②光インターフェイスグループ(高周波光/SFQ 変換および SFQ/光変換の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
斗内政吉	大阪大学	教授	光磁束制御とまとめ	平成14年11月～ 平成20年3月
川山巖	大阪大学	助教	光インターフェイス開発	平成14年11月～ 平成20年3月
鈴木幸子	大阪大学	助手	テラヘルツ計測技術の開発	平成17年7月～ 平成18年3月
紀和利彦	大阪大学	博士研究員	フォトミキシングシステム開発	平成14年11月～ 平成16年3月
鈴木正人	大阪大学	博士研究員	InGaAs光スイッチの開発	平成16年4月～ 平成18年3月
富成征弘	大阪大学	博士課程終了	YBCO光応答評価	平成14年11月～ 平成18年3月
堂田泰史	大阪大学	博士課程3年	磁束量子デバイス開発	平成14年11月～ 平成20年3月
上野晃治	大阪大学	修士課程終了	磁気光学顕微鏡開発	平成15年4月～ 平成17年3月
宮寺達也	大阪大学	修士課程終了	フォトミキシングシステム開発	平成15年4月～ 平成17年3月
金城隆平	大阪大学	修士課程2年	高周波計測システム開発	平成17年4月～ 平成20年3月
内田直次	大阪大学	修士課程終了	磁束量子の可視化	平成18年4月～ 平成19年3月
古賀寛規	大阪大学	修士課程2年	SFQデバイス作製	平成18年4月～ 平成20年3月
北村亮平	大阪大学	修士課程1年	磁気光学検出器開発	平成19年4月～ 平成20年3月
高山和久	大阪大学	修士課程1年	磁束量子の可視化	平成19年4月～ 平成20年3月
西田奈穂子	大阪大学	研究補助員	データ収集と解析	平成15年12月～ 平成17年8月
ミスラ ムクール	大阪大学	研究補助員	データ収集と解析	平成16年5月～ 平成16年9月

③SFQ基礎合グループ(接合の物理の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
前田京剛	東京大学	准教授	研究の総括	平成14年11月～ 平成20年3月
北野晴久	東京大学	助手	マイクロ波測定	平成14年11月～ 平成19年3月

井上亮太郎	東京大学	CREST 研究員	回路解析	平成14年11月～ 平成16年3月
木下健太郎	東京大学	CREST 研究員	薄膜作製・評価	平成16年4月～ 平成16年9月
ゴメス ルイス	東京大学	CREST 研究員	ジョセフソン接合の物理	平成17年5月～ 平成19年9月
井上祐吉	東京大学	修士課程 終了	IV特性測定	平成14年11月～ 平成16年3月
龍崎響	東京大学	修士課程 終了	ノイズ測定	平成14年11月～ 平成16年3月
大橋健良	東京大学	博士課程 3年	バルク単結晶作製	平成15年4月～ 平成20年3月
松村明佳	東京大学	修士課程	薄膜マイクロ波測定	平成15年4月～ 平成16年4月
太田健介	東京大学	博士課程 2年	マイクロ波測定	平成15年4月～ 平成20年3月
久保尊広	東京大学	修士課程 終了	IV特性測定	平成17年4月～ 平成19年3月
北村真一	東京大学	修士課程 2年	ノイズ測定	平成17年4月～ 平成20年3月
ポモルスキー キントフ	東京大学	修士課程	薄膜作製	平成17年4月～ 平成19年3月
中村大輔	東京大学	修士課程 2年	テラヘルツ測定	平成18年4月～ 平成20年3月
丸山修平	東京大学	修士課程 2年	固有接合特性測定	平成18年4月～ 平成20年3月
阿久津良宏	東京大学	修士課程 1年	IV特性測定	平成19年4月～ 平成20年3月
田仲由喜夫	名古屋大学	准教授	理論・データ解析	平成15年4月～ 平成20年3月
渡邊努	名古屋大学	博士研究 員	超伝導接合基礎理論	平成16年7月～ 平成20年3月
大成誠一郎	名古屋大学	助教	銅酸化物超伝導の輸送 現象の基礎理論	平成17年4月～ 平成20年3月
横山毅人	名古屋大学	博士課程 2年	超伝導接合伝導特性	平成16年7月～ 平成20年3月
澤雄生	名古屋大学	修士課程 2年	超伝導接合伝導特性	平成19年4月～ 平成20年3月
浅野泰寛	北海道大学	助教	超伝導接合の理論	平成17年4月～ 平成20年3月

5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
土浦宏紀 (International School for Advanced Studies 博士研究員)	名古屋大学にて 研究討論	名古屋市	H15.11.15 ～H15.11.23
Golubov Alexander (トエンテ大学 主幹研究員)	名古屋大学にて 研究討論	名古屋市	H16.9.10 ～H16.9.16
Golubov Alexander (トエンテ大学 主幹研究員)	名古屋大学にて 研究討論	名古屋市	H17.7.31 ～H17.8.7
Francesco Tafuri (ナポリ第二大学 教授)	NVLS2005 にて 研究発表	兵庫県淡路市	H18.12.17 ～H18.12.22
Nai-Chang Yeh (カリフォルニア工科大学 教授)	NVLS2005 にて 研究発表	兵庫県淡路市	H18.12.21 ～H18.12.23
Jian-rong Gao (国立宇宙研究所 主任研究員)	NVLS2006 にて 研究発表	京都市	H18.12.10 ～H18.12.14
John W. Neuberger (ノーステキサス大学 教授)	NVLS2006 にて 研究発表	京都市	H18.12.10 ～H18.12.14
Horst Rogall (トエンテ大学 教授)	NVLS2006 にて 研究発表	京都市	H18.12.10 ～H18.12.15

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 1 件、国際誌 94 件)

K. Takaki, A. Koizumi, T. Hanaguri, M. Nohara, H. Takagi, K. Kitazawa, Y. Kato, Y. Tsuchiya, H. Kitano, A. Maeda
"Effects of superconducting gap anisotropy on the flux flow resistivity in $Y(Ni_{1-x}Pt_x)_2B_2C$ "
Physical Review B, **66**, 184511-1 - 184511-5 (2002).

Y. Togawa, H. Kitano, A. Maeda
"Dynamic phase diagram of driven vortices in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ "
Journal of Low Temperature Physics, **131**, 907-911 (2003).

N. Kida, M. Tonouchia
"THz spectroscopic evidence for a charge-density-wave formation in a charge-ordered manganite $Pr_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ "
Physica B, **329-333**, 842-843 (2003).

A. Maeda, Y. Togawa, H. Kitano
"Dynamic phase diagram of vortices in high- T_c superconductors determined by experimental studies"
Physica B, **329-333**, 1346-1347 (2003).

A. Maeda, K. Kinoshita, H. Kitano, Y. Kato, K. Shibata, T. Sato, T. Nishizaki, N. Kobayashi
"Effect of impurities on the electronic structure of vortex core investigated by microwave surface impedance measurement"
Journal of Low Temperature Physics, **131**, 969-973 (2003).

- R. Inoue, H. Kitano, A. Maeda
"Double Sphere model in the enclosed cavity perturbation technique"
Journal of Applied Physics, **93**, 2736-2745 (2003).
- R. Inoue, H. Kitano and A. Maeda
"The inverse analysis of the enclosed cavity perturbation technique"
Physica B, **329-333**, 1546-1547 (2003).
- K. Kinoshita, Y. Inoue, Y. Tsuchiya, T. Umetsu, H. Kitano, A. Maeda, T. Hanaguri, T. Nishizaki, T. Sato, K. Shibata, N. Kobayashi
"Millimeter wave and microwave electrodynamic spectroscopy of $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{O}_y$ in the Meissner and mixed state"
Physica C, **388-389**, 417-418 (2003).
- H. Murakami, Y. Tominari, M. Tonouchi, T. Yasuda, H. Wald, P. Seidel, H. Schneidewind
"Ultrafast optical response of TBCCO(2212) thin films"
Physica C, **388-389**, 467-468 (2003).
- H. Murakami, T. Kiwa, M. Tonouchi, T. Yasuda
"THz imaging of supercurrent distribution in Meissner state of LPE-BSCCO film"
Physica C, **388-389**, 479-480 (2003).
- Y. Tominari, T. Kiwa, Murakami, M. Tonouchi, H. Wald, P. Seidel, 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).
- Y. Tanaka, Y. Nazarov and S. Kashiwaya
"Circuit theory of unconventional superconductor junctions"
Physical Review Letters, **90** (16), 167003-1- 167003-4 (2003).
- T. Kiwa, Y. Kamata, M. Misra, H. Murakami, and M. Tonouchi
"Backscattered Terahertz Radiation Imaging System to Visualize Supercurrent Distributions"
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **13** (2), 3675-3678 (2003).
- Y. Tominari, T. Kiwa, Murakami, M. Tonouchi, H. Wald, P. Seidel, 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 Transactions on applied superconductivity, **13** (2), 3730-3733 (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** (7) 1475-1478 (2003).
- H. Kashiwaya, I. Kurosawa, S. Kashiwaya, A. Sawa and Y. Tanaka
"Observation of phase-coherent transport in d-wave junctions"
Physical Review B, **68** (5), 054527-1 - 054527-5 (2003).

Y. Tanaka, A. Golubov and S. Kashiwaya

"Theory of charge transport in diffusive normal metal / conventional superconductor point contacts"
Physical Review B, **68** (5), 054513-1 - 054513-10 (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 the Physical Society of Japan, **72** (7), 1718-1723 (2003).

紀和利彦, 鈴木正人, 村上博成, 斗内政吉

"フォトミキサー・High-Tcジョセフソン接合ハイブリッドシステムの開発"
信学技報 SCE2003-24, 35-40 (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 the Physical Society of Japan, **72** (9), 2299-2307 (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. 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. Tanaka, Y.V. Nazarov, A. Golubov and S. Kashiwaya

"Theory of charge transport in diffusive normal metal / unconventional singlet superconductor 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 superconductor 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, Y. Asano and S. Kashiwaya

"Impurity scattering effect on 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).
- 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).
- 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. Kinoshita, H. Kitano, A. Maeda, T. Nishizaki, M. Maeda, K. Shibata, 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).
- H. Kitano, T. Ohashi, H. Ryuzaki, A. Maeda and I. Tsukada
"Frequency dependent microwave conductivity of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ "
Physica C, **412-414**, 130-133 (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** (2) 1602-1606 (2004).
- K. Ueno, H. Murakami, I. Kawayama, Y. Doda, M. Tonouchi, N. Chikumoto
"Magneto-optical imaging of magnetic flux distribution in high- T_c superconductors"
Physica C, **412-414**, 1343-1348 (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 Techniques, **52** (9), 2163-2168 (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).
- M. Suzuki and M. Tonouchi
"Fe-implanted InGaAs terahertz emitters for 1.56 μm wavelength excitation"
Applied Physics Letters, **86** (5), 051104-1 - 051104-3 (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 - 094513-16 (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 $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ as a Counter Electrode for Improving Uniformity"

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **15** (2), 145-148 (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 - 052512-4 (2005).

A. Maeda, Y. Inoue, H. Kitanok S. Okayasu and 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).

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).

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).

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).

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 - 140503-4 (2005).

A. Maeda, Y. Inoue and H. Kitano

"Study of kinetic friction of solid using driven lattice of quantized vortex in high-temperature superconductors -a new route to study microscopic tribology -"

Recent Advances in Multidisciplinary Applied Physics, 271-275 (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. Yokoyama, Y. Tanaka and J. Inoue
"Intrinsically s-wave like property of triplet superconductors with spin-orbit coupling"
Physical Review B (Rapid Communications), **72** (22), 220504-1 - 220504-4 (2005).
- 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 - 092504-4 (2006)
- Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami and 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).
- 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 - 094501-10 (2006).
- A. Maeda, H. Kitano, L. Gomez, T. Kubo, K. Ota and T. Ohashi
"High- T_c Josephson junction : towards improvement of $I_c R_N$ product and realization of phase qubits"
Journal of Physics: Conference Series, **43**, 1151-1154 (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 - 140504-4 (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 - 174522-8 (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-Tc Josephson Junction"
Superconductor Science and Technology, **19** (5), S403-S406 (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 - 064507-11 (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).

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 - 094704-6 (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).

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).

S. Kawabata, S. Kashiwaya, Y. Asano, Y. Tanaka and A. A. Golubov
"Macroscopic quantum dynamics of p-junction with ferromagnetic insulators"
Physical Review B, **74** (18), 180572-1 - 180572-4 (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 - 020502-4 (2007).

Y. Tanaka and A. A. Golubov

"Theory of the proximity effect in junctions with unconventional superconductors"

Physical Review Letters, **98** (3), 037003-1 - 037003-4 (2007).

H. Kitano, K. Ota and A. Maeda

"Study of switching events from the zero-voltage state of Bi2212 intrinsic Josephson junctions"

Superconductor Science and Technology, **20** (2), S68-S73 (2007).

I. Kawayama, 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), 588-594 (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 - 107002-4 (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), 094514-1 - 094514-10 (2007).

T. Yokoyama and Y. Tanaka

"Theory of tunneling spectroscopy of ferromagnetic superconductors"

Physical Review B, **75** (13), 132503-1 - 132503-4 (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 - 134508-9 (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 - 134510-8 (2007).

Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami and M. Tonouchi

"Optical Responses of Josephson Vortex Flow Transistor under Irradiation of Femtosecond Laser Pulses"

Japanese Journal of Applied Physics, **46** (4B), 2381-2384 (2007).

I. Kawayama, R. Kinjo, T. Kiwa, H. Murakami and M. Tonouchi

"Detection of Photomixing signals with a YBCO Josephson junction Coupled to a Coplanar Waveguide"

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **17** (2), 321-323 (2007).

T. Kimura, M. Watanabe, M. Sugimoto, Y. Fukai, M. Inoue and A. Fujimaki

"Fabrication of Inductively-Coupled Double-Josephson Junctions Using High-Temperature

Superconductors"

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **17** (2), 959-962 (2007).

C. Iniotakis, N. Hayashi, T. Sawa, T. Yokoyama, U. May, Y. Tanaka and M. Sigrist

"Andreev bound states and tunneling characteristics of a non-centrosymmetric superconductor"

Physical Review B, **76** (1), 012501-1 - 012501-4 (2007).

Y. Tanaka, A. Golubov, S. Kashiwaya and M. Ueda

"Anomalous Josephson effect between even- and odd-frequency superconductors"

Physical Review Letters, **99** (3), 037005-1 - 037005-4 (2007).

T. Yokoyama, Y. Sawa, Y. Tanaka, A. A. Golubov, A. Maeda and A. Fujimaki

"Quantitative model for IcR product in d-wave Josephson junctions"

Physical Review B, **76** (5), 052508-1 - 052508-4 (2007).

Y. Tanaka, Y. Tanuma and A. A. Golubov

"Odd-frequency pairing in normal metal/superconductor junctions"

Physical Review B, **76** (5), 054522-1 - 054522-13 (2007).

Y. Asano, Y. Tanaka, A. Golubov and S. Kashiwaya

"Conductance spectroscopy of spin-triplet superconductors"

Physical Review Letters, **99** (6), 067005-1 - 067005-4 (2007).

S. Akutagawa, T. Ohashi, H. Kitano, A. Maeda and J. Akimitsu

"Microwave electrical resistivity of moderately high T_c superconductor, Y₂C₃"

Physica C, **460-462**, 649-650 (2007).

H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda and I. Tsukada

"Kosteritz-Thouless type of superconducting phase fluctuations investigated by frequency-dependent microwave conductivity of underdoped La_{2-x}Sr_xCuO₄ thin films"

Physica C, **460-462**, 904-905 (2007).

T. Ohashi, H. Kitano, A. Maeda and I. Tsukada

"Carrier concentration dependence of critical fluctuation in La_{2-x}Sr_xCuO₄"

Physica C, **460-462**, 906-907 (2007).

A. Maeda, T. Umetsu and H. Kitano

"Viscosity of quantized vortex of high- T_c superconductors, La_{2-x}Sr_xCuO₄ as a function of carrier concentration"

Physica C, **460-462**, 1202-1203 (2007).

A. Maeda, D. Nakamura, H. Kitano and H. Matsumura

"Study of nano-scale friction using vortices in superconductors"

Physica C, **460-462**, 1282-1283 (2007).

H. Kitano, K. Ota and A. Maeda

"Switching current distribution in large Bi₂Sr₂CaCuO_y intrinsic Josephson junctions"

Physica C, **460-462**, 1483-1484 (2007).

H. Murakami, I. Kawayama, M. Tonouchi

"Fabrication of a prototype laser-magneto-optical imaging system"

Physica C, **460-462**, 1489-1490 (2007).

H. Murakami, Y. Tominari, M. Tonouchi

"Terahertz pulse radiation phenomena of High-T_c Superconductors by ultrashort optical pulse illumination"

Physica C, **460-462**, 1493-1494 (2007).

A. Maeda, H. Kitano, K. Kinoshita, T. Nishizaki, K. Shibata and N. Kobayashi

"Effect of Nonmagnetic Impurities on the Electronic State of Quasiparticles Confined in the Naturally Prepared Nanostructure under Magnetic Field in YBa₂Cu₃O_y"

Journal of the Physical Society of Japan, **76** (9), 094708-1- 094708-11 (2007).

A. Maeda, H. Kitano, H. Tsuchiya, K. Kinoshita, K. Shibata, T. Nishizaki and N. Kobayashi

"Dissipation of quantized vortex of high-T_c superconductors, investigated by microwave impedance: Novel physics in nano-scale space"

Physica C, **463-465**, 27-31 (2007).

(2)その他の著作物（総説、書籍など）

前田京剛, 北野晴久, 井上亮太郎, 花栗哲郎

"マイクロ波でみた物質の電荷励起"

固体物理, **38** (10), 649-662 (2003).

前田京剛

"高温超伝導体磁束格子のダイナミクスを利用した摩擦の物理の研究"

物性研究, **81** (6), 884-887 (2004).

前田京剛, 北野晴久, 井上祐吉

"摩擦のモデル系としての固体量子凝縮相 —超伝導磁束格子や密度波のナノトライボロジー—"

トライボロジスト「特集 ナノトライボロジー」, **49** (6), 493-498 (2004).

塚田捷, 田仲由喜夫, 前田京剛

"はじめに—超伝導接合の物理—"

固体物理, **40** (10), 667-671 (2005).

田仲由喜夫, 浅野泰寛

"異方的超伝導体接合におけるトンネル効果の理論の新展開"

固体物理, **40** (10), 683-698 (2005),

藤巻朗, 斗内政吉, 前田京剛,

"銅酸化物接合におけるジョセフソンデバイス研究の現状"

固体物理, **40** (10), 817-827 (2005).

前田京剛，加藤雄介

"物性物理学演習ーアシュクロフト・マーミンの問題解説ー"

吉岡書店, pp.473. (2006)

A. Maeda,

"Noise study in condensed matter physics - Towards extension to surrounding fields -"

Journal of Physics: Conference Series, **31**, 131-138, (2006).

A. Maeda,

"Energy dissipation at nano-scale topological defects of high-Tc superconductors: microwave study"

Proceedings of the 1st International Symposium on Topology in Ordered Phases 2005 (TOP 2005). edited by S. Tanda et al. World Scientific. 195-202, (2006).

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

① 招待講演 (国内会議 2 件、国際会議 40 件)

[国内会議]

藤巻 朗

"超高速・超低消費電力超伝導ナノデバイスシステムとプラズマプロセス"

日本学術振興会 プラズマ材料科学第153委員会 第75回研究会

名古屋, 名古屋大学

2006年3月3日

藤巻 朗

"単一磁束量子エレクトロニクスの新展開"

電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会

東京, 超伝導工学研究所

2007年1月26日

[国際会議]

Y. Tanaka

"Magnetotunneling spectroscopy in triplet superconductors"

3rd International Symposium on New Developments in Strongly Correlated Phase under Multiple Environment.

Osaka, Japan.

2003年2月20日

H. Kitano, A. Maeda, T. Takenobu, Y Iwasa

"Microwave conductivity of fullerene intercalation compounds: Mott transition driven by the orthorhombic distortion"

The Electrochemical Society 203rd Meeting.

Paris, France.

2003年4月27日-5月2日

A. Maeda, Y. Inoue, H. Kitano

"Study of kinetic friction between interfaces investigated by dynamics of vortices in high T_c cuprates"

The Joint 9th International Workshop on Vortex Matter and European Science Foundation Workshop on Vortex Dynamics.

Oleron, France.

2003年6月22日-27日

A. Maeda, T. Umetsu, K. Kinoshita, H. Kitano

"Flux flow of La-Sr-Cu-O system with various doping investigated by ac surface impedance measurement"

The Joint 9th International Workshop on Vortex Matter and European Science Foundation Workshop on Vortex Dynamics.

Oleron, France.

2003年6月22日-27日

Y. Tanaka

"Theoretical developments of nano superconductors and its applications. Theory of tunneling conductance in normal metal / unconventional superconductor junctions based on the Keldysh Green's function"

JST-CREST: The First NANOFAB Workshop

Kyoto, Japan

2003年11月11日

Y. Tanaka

"Theory of charge transport in unconventional superconductor junctions"

International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2004 (MSS2004) In the light of quantum computation.

Kanagawa, Japan.

2004年3月4日

A. Maeda

"Viscosity of vortex core of high- T_c superconductors - dissipation at natural nano structure"

Nanostructured Superconductors: From fundamentals to applications.

Bad Munstereifel, Germany.

2004年5月15日-19日

A. Maeda

"Experimental studies of dynamics of drive vortices of high- T_c superconductors: Dynamical phase diagram and application to physics friction"

5th International Conference on New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials.

Chongqing, China.

2004年6月11日-16日

Y. Tanaka

"Recent theoretical development of unconventional superconductor junctions"

The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS2004).

Sitges, Spain.

2004年7月14日

Y. Tanaka

"Anomalous charge transport in triplet superconductor junctions"

International Symposium on Spin-Triplet Superconductivity, and Ruthenate Physics.

Kyoto, Japan.

2004年10月27日

A. Maeda, H. Kitano, S. Savelev, F. Nori

"Nano-scale friction: kinetic friction of magnetic flux quanta and charge-density waves"

10th International Vortex State Studies Workshop.

Mumbai, India.

2005年1月9日-14日

Y. Togawa, K. Harada, A. Tonoumura, A. Maeda

"Direct observation of rectified motion of vortices using Lorentz microscopy"

10th International Vortex State Studies Workshop.

Mumbai, India.

2005年1月9日-14日

I. Kawayama, T. Miyadera and M. Tonouchi

"Generation and Detection System of Sub-Terahertz Waves with Photomixer and High- T_c Josephson Junction"

2005 Japan-Taiwan Symposium on Superconductive Electronics

Sapporo, Japan

2005年2月9日-11日

Y. Tanaka

"Novel charge transport in ferromagnet / unconventional superconductor junctions"

International Workshop of Electronic and Spin Transport in Superconductor / Ferromagnet Nanostructures.

Leiden, Netherland.

2005年2月21日

A. Maeda

"Energy dissipation at nano-scale topological defects of high- T_c superconductors: Microwave study"

The 1st International Conference on Topological Science and Technology "Topology in Ordered Phase".

Sapporo, Japan.

2005年3月7日-10日

Y. Tanaka

"Recent theoretical development of unconventional superconductor junctions"

International Workshop of Physics of superconducting phase shift Device -proximity effect and Mid gap Andreev resonant state-

Ischia, Italy.

2005年4月2日

A. Maeda

"Nano-scale friction : kinetic friction of magnetic flux quanta and charge-density waves"

International Tribology Conference

Kobe, Japan

2005年5月28日

A. Maeda

"Noise study in condensed matter physics – towards extension to surrounding fields –"

3rd 21st century COE symposium on physics of self-organization system –Astrophysics as interdisciplinary science-

Tokyo, Japan

2005年9月1日–3日

Y. Tanaka

"Theory of Macroscopic quantum tunneling in high T_c cuprate"

Joint JSPS and ESF Conference on Vortex matter in Nanostructured Superconductors (VORTEX IV).

Crete, Greece.

2005年9月3日–9日

Y. Tanaka

"Charge transport in d-wave superconductor junctions"

International Workshop on Weak Superconductivity (WWS'05).

Bratislava, Slovak Republic.

2005年9月17日

Y. Tanaka

"Variational Monte Carlo Studies of Superconductivity in \square -(BEDT-TTF) Salts"

International Symposium on Frontiers of Computational Science 2005

Nagoya, Japan

2005年12月12日–13日

A. Fujimaki

"HTS Josephson junctions toward sub-terahertz electronics"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日–22日

A. Maeda

"Exploring phase diagrams of high- T_c superconductor. LSCO –characterization by ac

conductivity fluctuation measurement and trial to fabricate Josephson junctions as a function of carrier concentration –"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日–22日

Y. Tanaka

"Theory of Josephson effect and quasiparticle current in diffusive normal metal /unconventional superconductor"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日–22日

Y. Tanaka

"Novel feature of proximity effect in unconventional superconductor junctions"

International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006, (MS+S2006)

Atsugi, Kanagawa, Japan

2006年2月27日–3月2日

A. Fujimaki, Y. Fukai, M. Inoue, T. Kubo, L. Gomez and A. Maeda

"Characterization of interface-engineered ramp-edge junctions made of LSCO/YBCO films"

2006 Applied Superconductivity Conference (ASC2006)

Seattle, Washington, USA

2006年8月27日–9月1日

A. Fujimaki

"Perspective of Superconductive Digital Electronics"

The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)

Kyoto, Japan

2006年12月11日–13日

Y. Tanaka

"Odd-frequency pairing state in superconducting junctions"

Physics of Nanoscale Superconducting Heterostructures

Leiden, The Netherlands

2007年7月2日–6日

A. Maeda, H. Kitano, T. Ohashi and I. Tsukada

"Phase diagram of cuprate superconductors investigated by vortex fluctuation shown up in ac conductivity measured by broadband technique"

The 11th International Workshop on Vortex Matter

Wroclaw, Poland

2006年7月3日–8日

Y. Tanaka

"Josephson effect and quasiparticle tunneling. "

School on Unconventional Superconductivity

International Center of Condensed Matter Physics, University of Brasilia, Brasilia, Brazil
2006年7月27日

Y. Tanaka
"General theory of proximity effect in unconventional superconductors"
6th Rencontres du Vietnam Nanophysics: from fundamentals to applications
Hanoi, Vietnam
2006年8月6日-12日

A. Maeda
"Dissipation of quantized vortex of high- T_c superconductors investigated by microwave physics in Nano-scale space-"
19th International Symposium on Superconductivity (ISS2006)
Nagoya, Japan
2006年10月30日-11月1日

A. Maeda
"Conference Summary (physics and chemistry, vortex physics) "
19th International Symposium on Superconductivity (ISS2006)
Nagoya, Japan
2006年10月30日-11月1日

A. Maeda, H. Kitano, T. Ohashi, I. Tsukada, T. Umetsu, L. Gomez, S. Kitamura and T. Kubo
"Superconductivity fluctuations in hole and electron doped cuprate investigated by microwave broadband technique"
The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)
Kyoto, Japan
2006年12月11日-13日

A. Maeda, T. Ohashi, H. Kitano, I. Tsukada, A. Tsukada and M. Naito
"Phase diagram of cuprate investigated by ac conductivity fluctuation measured by broadband technique"
6th International Conference on New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials (New³SC-6)
Sydney, Australia
2007年1月9日-11日

A. Maeda
"Dynamics of driven vortices of HTSC and application to physics of friction"
The Korean Superconductivity Society Meeting 2007
Yongpyong Resort, Korea
2007年8月16日-18日

A. Maeda
"Exploring novel aspects of the superconductivity state of high- T_c cuprates"
2007 Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP) Workshop on Superconductivity and Mesoscopic Quantum Phenomena

POSTECH, Pohang, Korea
2007年8月18日-20日

A. Maeda, H. Kitano, T. Ohashi, I. Tsukada, A. Tsukada and M. Naito
"Superconductivity fluctuation of high-Tc cuprates investigated by ac conductivity measurement"
The 10th Asia Pacific Physics Conference (APPC10)
POSTECH, Pohang, Korea
2007年8月21日-24日

A. Maeda
"Study of friction using driven vortices of superconductor as a model system"
The International Conference on Science of Friction
Irago View Hotel, Aichi, Japan
2007年9月9日-13日

A. Fujimaki
"Recent Progress in SFQ LSI Technology"
8th European Conference on Applied Superconductivity
Brussels Expo, Brussels, Belgium
2007年9月16日-20日

② 口頭発表 (国内会議 128 件、国際会議 39 件)

[国内会議]

前田京剛
"高温超伝導体磁束系の動的相図の実験的決定"
金属材料研究所研究会「超伝導体における渦糸状態の物理－統一的理解に向けて－」
仙台，東北大学金属材料研究所
2002年12月9日-10日

木下健太郎
"混合状態におけるYBa₂Cu₃O_y の電子状態に対するZn 置換効果"
金属材料研究所研究会「超伝導体における渦糸状態の物理－統一的理解に向けて－」
仙台，東北大学金属材料研究所
2002年12月9日-10日

梅津友行
"La_{2-x}Sr_xCuO₄ の混合状態におけるマイクロ波応答"
金属材料研究所研究会「超伝導体における渦糸状態の物理－統一的理解に向けて－」
仙台，東北大学金属材料研究所
2002年12月9日-10日

前田京剛
"高温超伝導体の超伝導状態－臨界磁場・磁気侵入長－"

応用物理学会超伝導分科会主催 第26回研究会 「高温超伝導体発見から15年－プロ
ログから現在までを振り返って－」
厚木，NTT厚木研究センター
2002年12月12日-13日

川山巖、斗内政吉
"SFQ/光インターフェースとしての光変調型磁束量子フロートランジスタの検討"
第50回応用物理学関係連合講演会
神奈川，神奈川大学横浜キャンパス
2003年3月27日-30日

井上祐吉，北野晴久，前田京剛
"摩擦の物理のモデル系としての $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ 磁束系のダイナミクス"
第50回応用物理学関係連合講演会
神奈川，神奈川大学横浜キャンパス
2003年3月27日-30日

井上亮太郎，北野晴久，前田京剛
"空洞共振器摂動法による異方性誘電体の測定"
第50回応用物理学関係連合講演会
神奈川，神奈川大学横浜キャンパス
2003年3月27日-30日

北野晴久，大橋健良，龍崎響，前田京剛，塚田一郎
"マイクロ波ブロードバンド法による $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜($x=0.04 \sim 0.08$) の電荷ダイ
ナミクス"
日本物理学会第58回年次大会
川内，東北大学
2003年3月28日-31日

梅津友行，北野晴久，前田京剛
" $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の混合状態におけるマイクロ波応答のSr 濃度依存性"
日本物理学会第58回年次大会
川内，東北大学
2003年3月28日-31日

木下健太郎，井上祐吉，梅津友行，花栗哲郎，北野晴久，前田京剛，柴田健次，西寄
照和，小林典男
"混合状態における高温超伝導体の不純物置換効果"
日本物理学会第58回年次大会
川内，東北大学
2003年3月28日-31日

吉永康之，脇田和弥，谷池浩一郎，井上真澄，藤巻 朗，早川尚夫
"積層型接合とランプエッジ型接合との特性比較"
第64回応用物理学会学術講演会
福岡，福岡大学七隈キャンパス

2003年8月30日-9月2日

斗内政吉, 村上博成, Hagen Wald, Pau Seidell
"YBCO薄膜からのテラヘルツ電磁波放射 -Prドーピング効果-"
第64回応用物理学学会学術講演会
福岡, 福岡大学七隈キャンパス
2003年8月30日-9月2日

斗内政吉, 福井隆, 村上博成
"単一フェムト秒光パルスによるYBCO薄膜中の磁束量子生成 -ビームプロファイル依存性-"
第64回応用物理学学会学術講演会
福岡, 福岡大学七隈キャンパス
2003年8月30日-9月2日

紀和利彦, 村上博成, 斗内政吉
"フォトミキシング光-マイクロ波変換システム(II)"
第64回応用物理学学会学術講演会
福岡, 福岡大学七隈キャンパス
2003年8月30日-9月2日

井上祐吉, 北野晴久, 前田京剛
"高温超電導体磁束系を利用した摩擦の物理の研究"
第64回応用物理学学会学術講演会
福岡, 福岡大学七隈キャンパス
2003年8月30日-9月2日

三輪和彦, 井上亮太郎, 北野晴久, 前田京剛, 大館康彦, 田辺英二
"開放端同軸共振器プローブによる誘電率の非破壊測定"
第64回応用物理学学会学術講演会
福岡, 福岡大学七隈キャンパス
2003年8月30日-9月2日

井上亮太郎, 三輪和彦, 北野晴久, 前田京剛, 大館康彦, 田辺英二
"複素透過係数による共振特性のリアルタイム測定"
第64回応用物理学学会学術講演会
福岡, 福岡大学七隈キャンパス
2003年8月30日-9月2日

村上博成, 上野晃司, 斗内政吉
"磁気光学効果を用いた高温超伝導体中の磁束観測 (I)"
日本物理学会2003年秋季大会
岡山, 岡山大学
2003年9月20日-23日

富成征弘, 村上博成, 斗内政吉
"YBCO薄膜におけるテラヘルツ電磁波放射特性のキャリアドーピング依存性 (II)"

日本物理学会2003年秋季大会

岡山，岡山大学

2003年9月20日-23日

大橋健良，北野晴久，龍崎響，前田京剛，塚田一郎

"マイクロ波ブロードバンド法によるアンダードープ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の電荷ダイナミクス"

日本物理学会2003年秋季大会

岡山，岡山大学

2003年9月20日-23日

北野晴久，大橋健良，龍崎響，前田京剛，塚田一郎

"不足ドープ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜におけるマイクロ波複素伝導度の周波数依存性と超伝導揺らぎ"

日本物理学会2003年秋季大会

岡山，岡山大学

2003年9月20日-23日

木下健太郎，井上祐吉，花栗哲郎，北野晴久，前田京剛，西寄照和，前田昌孝，小林典男

"混合状態における高温超電導体の電子状態に対する磁性・非磁性不純物置換効果の比較"

日本物理学会2003年秋季大会

岡山，岡山大学

2003年9月20日-23日

井上祐吉，北野晴久，前田京剛

"高温超電導体磁束系を利用した摩擦の物理の研究"

日本物理学会2003年秋季大会

岡山，岡山大学

2003年9月20日-23日

内藤利光，脇田和弥，吉永康之，井上真澄，藤巻 朗，早川尚夫

"高温超伝導体表面改質型積層ジョセフソン接合における全層超伝導化に対する試み"

平成15年度電気関係学会東海支部連合大会

名古屋大学

2003年10月2日-3日

前田京剛

"高温超伝導体磁束格子のダイナミクスを利用した摩擦の物理の研究"

物性研究所短期研究会「摩擦の物理」

京都，京都大学基礎物理学研究所

2003年10月8日-10日

富成征弘，村上博成，斗内政吉

"酸素欠損YBCO薄膜からのテラヘルツ電磁波放射特性"

電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会

神戸，通信総合研究所関西先端研究センター
2003年10月17日

前田京剛
"マイクロ波でみた高温超伝導体磁束量子コアのエネルギー散逸ーキャリヤドーピングと不純物効果ー"
磁束線物理国内会議
つくば，物質・材料研究機構
2003年12月4日-5日

前田京剛
"超伝導体磁束格子のダイナミクスを利用した摩擦の物理の研究"
磁束線物理国内会議
つくば，物質・材料研究機構
2003年12月4日-5日

前田京剛
"磁束量子の物理～フラクソニクスの基礎～"
応用物理学会超伝導分科会主催第28回研究会「進化するフラクソニクス～磁束量子の物理，SFQ デジタルから量子コンピュータまで～」(物理学会協賛)
東京，機械振興会館
2003年12月11日

谷池浩一郎，吉永康之，脇田和弥，木村大至，井上真澄，藤巻 朗，早川尚夫
"高温超伝導体を用いた積層型接合の電気的特性の解析"
第2回超伝導・低温工学若手合同講演会
大阪，大阪市立大学文化交流センター
2004年1月16日

川山巖，堂田泰，宮寺達也，紀和利彦，鈴木正人，村上博成，斗内政吉
"高温超伝導体を用いたSFQ論理回路用光インターフェースの開発"
第2回超伝導・低温工学若手合同講演会
大阪，大阪市立大学文化交流センター
2004年1月16日

吉永康之，脇田和弥，谷池浩一郎，木村大至，井上真澄，藤巻 朗，早川尚夫
"表面改質型積層ジョセフソン接合の障壁層の解析"
電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会
東京，機械振興会館
2004年1月23日

大舘康彦，井上亮太郎，前田京剛，田辺英二
"MW-studio を用いた高周波誘電率測定"
2004年電子情報通信学会総合大会
東京，東京工業大学大岡山キャンパス
2004年3月22日-25日

前田京剛

"固体量子凝縮相を利用したマクロ系摩擦研究：固体界面摩擦解明のための新しいアプローチ"

合同シンポジウム「摩擦の科学の新展開：ジオからアトミックトライボロジー」)

日本物理学会第59回年次大会

箱崎，九州大学

2004年3月27日-30日

大橋健良，北野晴久，龍崎響，前田京剛，塚田一郎

"マイクロ波ブロードバンド法による $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の電荷ダイナミクス"

日本物理学会第59回年次大会

箱崎，九州大学

2004年3月27日-30日

北野晴久，大橋健良，龍崎響，前田京剛，塚田一郎

" $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜のマイクロ波伝導度と超伝導揺らぎ"

日本物理学会第59回年次大会

箱崎，九州大学

2004年3月27日-30日

木下健太郎，北野晴久，前田京剛，西寄照和，前田昌孝，柴田憲次，小林典男

"ZN,Ni 不純物置換効果による高温超電導体磁束量子コアの統一的理解"

日本物理学会第59回年次大会

箱崎，九州大学

2004年3月27日-30日

井上祐吉，北野晴久，前田京剛，塚田一郎，岡安悟

"重イオン照射した高温超電導体の磁束系における摩擦の物理の研究"

日本物理学会第59回年次大会

箱崎，九州大学

2004年3月27日-30日

西谷 崇，石川義人，吉永康之，井上真澄，藤巻 朗，早川尚夫

"ランプエッジ型接合における障壁層の膜厚方向に対する均一性の評価"

第51回応用物理学関係連合講演会

八王子，東京工科大学

2004年3月28日-31日

木村大至，吉永康之，脇田和弥，谷池浩一郎，井上真澄，藤巻 朗，早川尚夫

"表面改質型積層ジョセフソン接合の障壁層の考察"

第51回応用物理学関係連合講演会

八王子，東京工科大学

2004年3月28日-31日

井上真澄，吉永康之，脇田和弥，谷池浩一郎，木村大至，藤巻 朗，早川尚夫

"表面改質型積層ジョセフソン接合の障壁層の微細構造観察"

第51回応用物理学関係連合講演会

八王子，東京工科大学
2004年3月28日-31日

谷池浩一郎，吉永康之，脇田和弥，木村大至，井上真澄，藤巻 朗，早川尚夫
"アモルファス層の堆積による積層型ジョセフソン接合の作製"
第51回応用物理学関係連合講演会
八王子，東京工科大学
2004年3月28日-31日

村上博成，川山巖，斗内政吉
"磁束量子の極短光パルス制御"
応用磁気学会，第136回研究会「高温超伝導薄膜材料の15年史：酸化物材料を創る」
東京，機械振興会館
2004年5月19日

木村大至，谷池浩一郎，西谷 崇，吉永康之，井上真澄，藤巻 朗
"積層型ジョセフソン接合にむけたSrTiO₃傾斜基板上的の下部電極薄膜の検討"
第65回応用物理学会学術講演会
東北学院大学泉キャンパス
2004年9月1日-4日

谷池浩一郎，木村大至，井上真澄，藤巻 朗
"アモルファス層の堆積による積層型ジョセフソン接合の障壁層の作製"
第65回応用物理学会学術講演会
仙台，東北学院大学泉キャンパス
2004年9月1日-4日

井上真澄，吉永康之，谷池浩一郎，木村大至，西谷 崇，藤巻 朗
"表面改質型積層ジョセフソン接合特性の加速電圧依存性"
第65回応用物理学会学術講演会
仙台，東北学院大学泉キャンパス
2004年9月1日-4日

堂田泰史，川山巖，村上博成，斗内政吉
"ジョセフソン磁束量子フロートランジスタのパルス電流応答"
第65回応用物理学会学術講演会
仙台，東北学院大学泉キャンパス
2004年9月1日-4日

村上博成，富成征弘，内山哲治，井口家成，王鎮，斗内政吉
"高温超伝導体からのテラヘルツ電磁波放射特性"
第65回応用物理学会学術講演会
仙台，東北学院大学泉キャンパス
2004年9月1日-4日

鈴木正人，斗内政吉
"1.5 μm 帯フェムト秒レーザー用 InGaAs テラヘルツ電磁波検出素子の開発"
第65回応用物理学会学術講演会

仙台，東北学院大学泉キャンパス
2004年9月1日-4日

鈴木正人，斗内政吉
"1.5 μm 帯フェムト秒レーザー励起用 InGaAs テラヘルツ電磁波放射素子のアニール依存性"
第65回応用物理学会学術講演会
仙台，東北学院大学泉キャンパス
2004年9月1日-4日

宮寺達也，川山巖，紀和利彦，塚田啓二，斗内政吉
"チューナブルサブテラヘルツ電磁波発生・検出システム"
第65回応用物理学会学術講演会
仙台，東北学院大学泉キャンパス
2004年9月1日-4日

大橋健良，北野晴久，前田京剛，塚田一郎
"ブロードバンド測定法を用いた高温超伝導体薄膜の高周波特性評価"
第65回応用物理学会学術講演会
仙台，東北学院大学泉キャンパス
2004年9月1日-4日

北野晴久，大橋健良，前田京剛，塚田一郎
"高温超伝導体の超伝導揺らぎ伝導度の周波数依存性と動的スケーリング解析"
日本物理学会2004 年秋季大会
青森，青森大学
2004年9月12日-15日

大橋健良，北野晴久，前田京剛，塚田一郎
"ブロードバンド法による $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の電荷ダイナミクスと基盤結晶対称性"
日本物理学会2004 年 秋季大会
青森，青森大学
2004年9月12日-15日

太田健介，北野晴久，前田京剛
"高周波におけるDNA の電気伝導度測定"
日本物理学会2004 年秋季大会
青森，青森大学
2004年9月12日-15日

鈴木正人，斗内政吉
"1.5 μm 帯励起による Fe+イオン注入 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ からのテラヘルツ波放射"
第15 回光物性研究会
京都，京都大学
2004年12月

木村大至，脇田和弥，吉永康之，谷池浩一郎，西谷 崇，井上真澄，藤巻 朗
"異種材料を用いた積層型ジョセフソン接合の作製"

第3回低温工学・超伝導若手合同講演会

大阪，大阪大学中之島センター

2004年12月17日

川山巖，宮寺達也，紀和利彦，斗内政吉

"フォトミキシング/ジョセフソン接合ハイブリッド THz 波発生・検出システムの開発"

第3回低温工学・超伝導若手合同講演会

大阪，大阪大学中之島センター

2004年12月17日

川山巖、宮寺達也、金城隆平、斗内政吉

"フォトミキサーと高温超伝導ジョセフソン接合を用いたサブテラヘルツ波の発生・検出システム"

電子情報通信学会電子デバイス研究会

東北大学

2005年3月3日-4日

川山巖、宮寺達也、村上博成、斗内政吉

"フォトミキシング及びジョセフソン接合を用いたTHz波発生・検出システムの開発"

電気情報通信学会総合大会2005年総合大会 超伝導サブテラヘルツエレクトロニクスシンポジウム

大阪大学豊中キャンパス

2005年3月21日-24日

北野晴久，大橋健良，前田京剛，塚田一郎

"高温超伝導体の超伝導揺らぎ交流伝導度の動的スケーリング解析とドープ量依存性"

日本物理学会第60年次大会

野田市，東京理科大学野田キャンパス

2005年3月24日-27日

大橋健良，北野晴久，前田京剛，赤池宏之，藤巻朗

"従来超伝導体における超伝導揺らぎ伝導度の動的スケーリング解析"

日本物理学会第60年次大会

野田市，東京理科大学野田キャンパス

2005年3月24日-27日

前田京剛，井上祐吉，北野晴久，サフェレフ・セルゲイ，ノリ・フランコ，塚田一郎，岡安悟

"駆動された超伝導体磁束格子の摩擦現象における静摩擦と動摩擦のクロスオーバー"

日本物理学会第60年次大会

野田市，東京理科大学野田キャンパス

2005年3月24日-27日

井上真澄，谷池浩一郎，木村大至，藤巻 朗

"低圧スパッタを用いた積層型ジョセフソン接合の作製プロセスの検討"

第52回応用物理学関係連合講演会

さいたま，埼玉大学

2005年3月29日-4月1日

西谷 崇, 深井由高, 谷池浩一郎, 木村大至, 井上真澄, 藤巻 朗
"元素置換電極を用いた表面改質型ランプエッジジョセフソン接合の特性向上"
第52回応用物理学関係連合講演会
さいたま, 埼玉大学
2005年3月29日-4月1日

木村大至, 谷池浩一郎, 西谷 崇, 井上真澄, 藤巻 朗
"異なる電極材料の利用による表面改質型積層ジョセフソン接合の特性向上"
第52回応用物理学関係連合講演会
さいたま, 埼玉大学
2005年3月29日-4月1日

川山巖, 宮寺達也, 村上博成, 紀和利彦, 塚田啓二, 斗内政吉
"空間結合型サブテラヘルツ電磁波発生・検出システムの開発"
第52回応用物理学関係連合講演会
さいたま, 埼玉大学
2005年3月29日-4月1日

金城隆平, 宮寺達也, 川山巖, 村上博成, 紀和利彦, 塚田啓二, 斗内政吉
"導波路結合型サブテラヘルツ電磁波発生・検出システムの開発"
第52回応用物理学関係連合講演会
さいたま, 埼玉大学
2005年3月29日-4月1日

堂田泰史, 川山巖, 村上博成, 斗内政吉
"ジョセフソン磁束量子フロートランジスタの交流応答特性"
第52回応用物理学関係連合講演会
さいたま, 埼玉大学
2005年3月29日-4月1日

村上博成, 上野晃治, 堂田泰史, 川山巖, 斗内政吉
"磁束量子状態のダイナミック検出システムの開発(I)"
第52回応用物理学関係連合講演会
さいたま, 埼玉大学
2005年3月29日-4月1日

太田健介, 北野晴久, 前田京剛
"固有ジョセフソン接合系におけるゼロボルト状態の寿命測定"
第52回応用物理学関係連合講演会
さいたま, 埼玉大学
2005年3月29日-4月1日

西谷 崇, 深井由高, 木村大至, 杉本 学, 井上真澄, 藤巻 朗, 川山 巖,
斗内政吉
"高温超伝導SFQ回路に向けた光入力インターフェイス回路の設計"
第66回応用物理学学会学術講演会

徳島，徳島大学
2005年9月7日-11日

杉本 学，木村大至，西谷 崇，深井由高，井上真澄，藤巻 朗
"低圧スパッタを利用した積層ジョセフソン接合の特性"
第66回応用物理学会学術講演会
徳島，徳島大学
2005年9月7日-11日

深井由高，西谷 崇，木村大至，杉本 学，井上真澄，藤巻 朗
"表面改質型ランブエッジ接合における障壁層の均一性の検討"
第66回応用物理学会学術講演会
徳島，徳島大学
2005年9月7日-11日

金城隆平，川山巖，村上博成，斗内政吉
"導波路結合型サブテラヘルツ電磁波発生・検出システムの開発(II)"
第66回応用物理学会学術講演会
徳島，徳島大学
2005年9月7日-11日

太田健介，北野晴久，前田京剛
"高温超伝導体固有ジョセフソン接合系におけるゼロボルト状態の寿命測定"
日本物理学会2005年秋季大会
京田辺市，同志社大学
2005年9月19日-22日

富成 征弘，村上 博成，斗内 政吉
"酸素量をコントロールしたYBCO薄膜のテラヘルツ電磁波放射および分光特性"
日本物理学会2005年秋季大会
京田辺市，同志社大学
2005年9月19日-22日

北野晴久，大橋健良，前田京剛，塚田一郎
" $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜における臨界揺らぎと超伝導相図"
日本物理学会2005年秋季大会
京田辺市，同志社大学
2005年9月19日-22日

大橋健良，北野晴久，前田京剛，塚田一郎
" $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の超伝導揺らぎの磁場依存性"
日本物理学会2005年秋季大会
京田辺市，同志社大学
2005年9月19日-22日

太田健介，北野晴久，前田京剛
"高温超伝導体固有ジョセフソン接合系におけるゼロボルト状態の寿命測定"

日本物理学会2005年秋季大会
京田辺，同志社大学京田辺キャンパス
2005年9月19日-22日

北野晴久，大橋健良，前田京剛，塚田一郎
"La_{2-x}Sr_xCuO₄ 薄膜における臨界揺らぎと超伝導相図"
日本物理学会2005年秋季大会
京田辺，同志社大学京田辺キャンパス
2005年9月19日-22日

大橋健良，北野晴久，前田京剛，塚田一郎
"La_{2-x}Sr_xCuO₄ 薄膜の超伝導揺らぎの磁場依存性"
日本物理学会2005年秋季大会
京田辺，同志社大学京田辺キャンパス
2005年9月19日-22日

堂田泰史，川山巖，村上博成，斗内政吉
"ジョセフソン磁束量子フロートランジスタの交流特性"
電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会
名古屋，名古屋大学
2005年10月14日

井上真澄，木村大至，谷池浩一郎，杉本 学，藤巻 朗
"低圧スパッタを利用して作製した積層型ジョセフソン接合の障壁層の微細構造観察"
第53回応用物理学関係連合講演会
東京，武蔵工業大学世田谷キャンパス
2006年3月22日-26日

木村大至，西谷 崇，渡邊光弘，杉本 学，深井由高，井上真澄，藤巻 朗
"高温超伝導体を用いた二重ジョセフソン接合に関する研究"
第53回応用物理学関係連合講演会
東京，武蔵工業大学世田谷キャンパス
2006年3月22日-26日

太田真輔，八田和己，楠正暢，西川博昭，本津茂樹，川山巖，斗内政吉，藤巻朗
"単一磁束量子/光学変換のための高温超伝導ナノブリッジの作製"
第53回応用物理学関係連合講演会
東京，武蔵工業大学世田谷キャンパス
2006年3月22日-26日

川山 巖，金城隆平，村上博成，斗内政吉，西谷 崇，深井由高，井上真澄，藤巻 朗
"高温超伝導SFQ回路用光入力インターフェースの開発"
第53回応用物理学関係連合講演会
東京，武蔵工業大学世田谷キャンパス
2006年3月22日-26日

堂田泰史, 川山巖, 村上博成, 斗内政吉
"ジョセフソン磁束量子フロートランジスターの高周波特性"
第53回応用物理学関係連合講演会
東京, 武蔵工業大学世田谷キャンパス
2006年3月22日-26日

大橋健良, 北村真一, 北野晴久, 前田京剛, 塚田一郎
" $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜における超伝導臨界揺らぎの次元性のキャリア濃度依存性"
日本物理学会第61回年次大会
松山, 愛媛大学
2006年3月27日-30日

北野晴久, 太田健介, 前田京剛
"Bi系固有ジョセフソン接合におけるスイッチング電流分布のサイズ依存性"
日本物理学会第61回年次大会
松山, 愛媛大学
2006年3月27日-30日

太田健介, 北野晴久, 前田京剛
"Bi系固有ジョセフソン接合におけるスイッチング電流分布のマイクロ波照射効果"
日本物理学会第61回年次大会
松山, 愛媛大学
2006年3月27日-30日

久保尊広, Luis Gómez, 深井由高, 井上真澄, 北野晴久, 前田京剛, 藤巻朗
" $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_{4+\delta}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ランプエッジ型ヘテロ接合におけるI-V特性評価"
日本物理学会第61回年次大会
松山, 愛媛大学
2006年3月27日-30日

深井由高, 山田隆宏, 井上真澄, 寺部雅能, 藤巻 朗, 川山 巖, 斗内政吉
"Nbを用いた単一磁束量子回路への光入力インターフェースに関する研究"
第67回応用物理学学会学術講演会
草津, 立命館大びわこ・くさつキャンパス
2006年8月29日-9月1日

堂田泰史, 川山巖, 村上博成, 斗内政吉
"ジョセフソン磁束量子フロートランジスターの光応答"
第67回応用物理学学会学術講演会
草津, 立命館大びわこ・くさつキャンパス
2006年8月29日-9月1日

前田京剛, 中村大輔, 井上祐吉, 北野晴久, 塚田一郎, 岡安悟, サフェレフ・セルゲイ, ノリ・フランコ
"超伝導体磁束格子で調べた摩擦現象における動的相転移"
日本物理学会2006年秋季大会
千葉, 千葉大学西千葉キャンパス

2006年9月23日-26日

大橋健良, 北野晴久, 前田京剛, 塚田一郎

"マイクロ波でみた $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の超伝導ゆらぎ—膜厚依存性と外部磁場効果—"

日本物理学会2006年秋季大会

千葉, 千葉大学西千葉キャンパス

2006年9月23日-26日

太田健介, 丸山修平, 北野晴久, 前田京剛

"高温超伝導体の微少固有接合におけるゼロボルト状態の寿命測定"

日本物理学会2006年秋季大会

千葉, 千葉大学西千葉キャンパス

2006年9月23日-26日

中村大輔, 久保尊広, Luis Gomez, 北野晴久, 前田京剛

"磁束量子のダイナミクスを用いた最大静止摩擦力の待機時間依存性"

日本物理学会2006年秋季大会

千葉, 千葉大学西千葉キャンパス

2006年9月23日-26日

芥川智思, 大橋健良, 北野晴久, 前田京剛, 秋光純

"マイクロ波を用いた Y_2C_3 の複素電気伝導度測定"

日本物理学会2006年秋季大会

千葉, 千葉大学西千葉キャンパス

2006年9月23日-26日

芥川智思, 大橋健良, 北野晴久, 前田京剛, 秋光純

"クリーンな超伝導体 Y_2C_3 のフラックスフロー"

日本物理学会2006年秋季大会

千葉, 千葉大学西千葉キャンパス

2006年9月23日-26日

北野晴久

"固有ジョセフソン接合と超伝導共振器を用いた量子状態制御の研究"

科学技術振興機構 戦略的想像研究推進事業 さきがけ 「量子と情報」研究領域

第1回研究終了報告会

東京, こまばエミナース

2006年11月16日

太田真輔, 楠正暢, 西川博昭, 本津茂樹, 川山巖, 斗内政吉, 藤巻朗

"SFQ/光変換のための高温超伝導ナノブリッジの作製と超伝導特性"

平成18年電気関係学会関西支部連合大会

大阪, 大阪工業大学

2006年11月25日-26日

太田真輔, 楠正暢, 西川博昭, 本津茂樹, 川山巖, 斗内政吉, 藤巻朗

"高温超伝導ナノブリッジ作製プロセスの検討"

第5回低温工学・超伝導若手合同講演会
大阪，大阪市立大学文化交流センター
2006年12月7日

堂田泰史，川山巖，村上博成，斗内政吉
"磁束量子フロートランジスタの光応答計測"
第5回低温工学・超伝導若手合同講演会
大阪市立大学文化交流センター
2006年12月7日

前田京剛，大橋健良，北野晴久，塚田一郎，東田昭雄，内藤方夫
"銅酸化物超伝導体ホールドープ系および電子ドープ系の超伝導"
第14回渦糸物理国内会議
登別，登別温泉ホテルまほろば会議場
2006年12月17日-19日

中村大輔，澤山高士，久保尊広，Luis B. Gomez
"銅酸化物超伝導体磁束格子のダイナミクス：普遍的スケーリング"
第14回渦糸物理国内会議
登別，登別温泉ホテルまほろば会議場
2006年12月17日-19日

前田京剛，大橋健良，北野晴久，塚田一郎，北野晴久，前田京剛，
"銅酸化物超伝導体ホールドープ系LSCOにおける超伝導ゆらぎの磁場効果"
科学研究費補助金 特定領域研究「異常量子物質の創製－新しい物理を生む新物質
－」2006年度成果報告会
東京，東京大学本郷キャンパス
2007年1月5日-7日

北野晴久，大橋健良，前田京剛，東田昭雄，内藤方夫
"電子ドープ系LCCOのマイクロ波ブロードバンド測定"
科学研究費補助金 特定領域研究「異常量子物質の創製－新しい物理を生む新物質
－」2006年度成果報告会
東京，東京大学本郷キャンパス
2007年1月5日-7日

川山巖，堂田泰史，村上博成，斗内政吉
"フェムト秒パルスレーザー照射したYBCOジョセフソン接合の光応答"
日本物理学会2007年春季大会
鹿児島，鹿児島大学郡元キャンパス
2007年3月18日-21日

前田京剛
"量子凝縮系をモデルに用いた摩擦の素過程と制御"
日本物理学会2007年春季大会
鹿児島，鹿児島大学郡元キャンパス
2007年3月18日-21日

大橋健良, 北野晴久, 前田京剛, 東田昭雄, 内藤方夫
"電子ドープ系高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ のマイクロ波伝導度"
日本物理学会2007年春季大会
鹿児島, 鹿児島大学郡元キャンパス
2007年3月18日-21日

太田健介, 北野晴久, 丸山修一, 前田京剛, 町敬人, 田辺圭一
"高温超伝導体の微小固有接合におけるスイッチング特性解析とMQT"
日本物理学会2007年春季大会
鹿児島, 鹿児島大学郡元キャンパス
2007年3月18日-21日

中村大輔, 澤山高士, 久保尊広, Luis B. Gomez, 北野晴久, 前田京剛
"LSCOの駆動された磁束格子による動的相転移"
日本物理学会2007年春季大会
鹿児島, 鹿児島大学郡元キャンパス
2007年3月18日-21日

深谷康太, 佐々木浩一, 高 軍思, 木村大至, 渡邊光弘, 井上真澄, 藤巻 朗, 豊田
浩孝, 岩田 聡, 菅井秀郎
"RF マグネトロンプラズマを用いたYBaCuO 超伝導薄膜の作製とそのプラズマ診断"
第54回応用物理学関係連合講演会
相模原, 青山学院大学相模原キャンパス
2007年3月27日-30日

木村大至, 渡邊光弘, 林 孝信, 豊田浩孝, 菅井秀郎, 井上真澄, 藤巻 朗
"表面波プラズマを用いた表面改質型積層ジョセフソン接合の作製"
第54回応用物理学関係連合講演会
相模原, 青山学院大学相模原キャンパス
2007年3月27日-30日

渡邊光弘, 木村大至, 林 孝信, 豊田浩孝, 菅井秀郎, 井上真澄, 藤巻 朗
"高温超伝導体ジョセフソン接合の表面改質時のECRプラズマ内イオネエネルギーの評価"
第54回応用物理学関係連合講演会
相模原, 青山学院大学相模原キャンパス
2007年3月27日-30日

梶野顕明, 杉本 学, 井上真澄, 藤巻 朗, 楠 正暢
"SFQ/光インターフェイス技術のためのYBCOナノブリッジの作製"
第54回応用物理学関係連合講演会
相模原, 青山学院大学相模原キャンパス
2007年3月27日-30日

北村亮平, 川山巖, 村上博成, 斗内政吉
"レーザーMO顕微鏡による超伝導デバイス中の磁束観測"

第54回応用物理学関係連合講演会
相模原，青山学院大学相模原キャンパス
2007年3月27日-30日

村上博成，斗内政吉
"磁束量子観測用レーザー走査型磁気光学顕微鏡の開発"
第54回応用物理学関係連合講演会
相模原，青山学院大学相模原キャンパス
2007年3月27日-30日

ゴメスルイス，北村真一，久保尊広，北野晴久，前田京剛
"強磁性体ナノストリップを利用して作成したジョセフソン接合"
第54回応用物理学関係連合講演会
相模原，青山学院大学相模原キャンパス
2007年3月27日-30日

北野晴久，太田健介，丸山修平，前田京剛，町 敬人，田辺圭一
"Bi系微小固有ジョセフソン接合におけるスイッチング電流分布"
第54回応用物理学関係連合講演会
相模原，青山学院大学相模原キャンパス
2007年3月27日-30日

前田京剛
"高周波領域での磁束挙動"
応用物理学会超伝導分科会第35回研究会「超伝導高周波現象の基礎と応用研究の最前線」東京，超電導工学研究所
2007年6月22日

林 孝信，渡邊光弘，木村大至，井上真澄，藤巻 朗，豊田浩孝，菅井秀郎
"表面波励起プラズマによる積層ジョセフソン接合の表面改質"
第68回応用物理学会学術講演会
札幌，北海道工業大学
2007年9月4日-8日

深谷康太，佐々木浩一，高 軍思，木村大至，渡邊光弘，井上真澄，藤巻 朗，菅井秀郎
"マグネトロンスパッタYBaCuO薄膜の臨界温度とプラズマ中の活性粒子密度との相関"
第68回応用物理学会学術講演会
札幌，北海道工業大学
2007年9月4日-8日

堂田泰史，川山巖，村上博成，斗内政吉
"ジョセフソン磁束量子フロートランジスタ型高速光入力素子の開発"
第68回応用物理学会学術講演会
札幌，北海道工業大学
2007年9月4日-8日

田仲由喜夫

"奇周波数クーパー対の物理"

日本物理学会第62回年次大会

札幌, 北海道大学

2007年9月21日-24日

田沼慶忠, 田仲由喜夫, A.A. Golubov

"s波超伝導体の磁束芯と奇周波数ペアリング"

日本物理学会第62回年次大会

札幌, 北海道大学

2007年9月21日-24日

田仲由喜夫, 柏谷聡, A. Golubov, 上田正仁

"奇周波数超伝導体接合における異常なジョセフソン効果"

日本物理学会第62回年次大会

札幌, 北海道大学

2007年9月21日-24日

[国際会議]

A. Maeda, H. Kitano

"Study of strongly correlated soft material by microwave cavity perturbation technique"

International Symposium on "Dynamic Control of Strongly Correlated Softmaterials (SCS) "

Tokyo, Japan.

2002年11月29日-30日

A. Maeda, T. Umetsu, H. Kitano, K. Miwa, R. Inoue, E. Tanabe,

"Vortex core property of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ at microwave frequencies as a function of carrier concentration"

2002 APS March Meeting (Bull. Am. Phys. Soc. 48 (2003) 1380.).

Austin, Texas, U. S. A.

2003年3月3日-7日

T. Kiwa and M. Tonouchi

"Optical-Microwave Converter: Superconductor/Photomixer Hybrid System"

2003 IEEE MTT-S International Microwave Symposium.

PA, USA.

2003年6月8日-13日

T. Kiwa and M. Tonouchi

"Photomixing Technology for Optical-Microwave Converter"

International Superconducting Electronics Conference 2003 (ISEC2003).

Sydney, Australia.

2003年7月7日-11日

T. Kiwa and M. Tonouchi

"Generation of sub-THz Wave Using Semiconductor Photomixer"

International Superconducting Electronics Conference 2003 (ISEC2003).

Sydney, Australia.

2003年7月7日-11日

M. Tonouchi and H. Murakami

"Optical Control of Vortices in YBCO Thin Films"

10th International Workshop on Oxide Electronics(WOE10).

Augsburg, Germany.

2003年9月11日-13日

T. Kiwa, H. Murakami, and M. Tonouchi

"Optical-Microwave Conversion System with High-Tc Josephson Junction Detector"

The 28th International Conference on Infrared and Millimeter Waves (IRMMW2003).

Shiga, Japan.

2003年9月29日-10月2日

A. Maeda, Y. Inoue, H. Kitano

"Study of kinetic friction of solid using driven lattice of quantized vortex in high-temperature superconductors: A new route to study microscopic tribology"

1st International Meeting on Applied Physics.

Badajoz, Spain.

2003年10月13日-18日

I. Kawayama, Y. Doda, T. Kiwa, and M. Tonouchi

"Optical-to-Electrical Signal Converter with Superconducting Vortex Flow Transistors"

16th International Symposium on Superconductivity (ISS2003)

Tsukuba, Japan.

2003年10月27日-29日

H. Kitano, T. Ohashi, H. Ryuzaki, A. Maeda, I. Tsukada

"Frequency dependent microwave conductivity of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films"

16th International Symposium on Superconductivity (ISS2003)

Tsukuba, Japan.

2003年10月27日-29日

R. Inoue, H. Kitano, A. Maeda

"Geometrical factors in the measurement of high temperature superconductors by the enclosed cavity perturbation technique"

Asia-Pacific Microwave Conference 2003 (APMC2003).

Seoul, Korea.

2003年11月5日-7日

A. Maeda, H. Kitano, T. Ohashi, I. Tsukada

"Charge dynamics of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ investigated by microwave broadband technique"

2003 APS March Meeting (Bull. Am. Phys. Soc. 49 (2004) 588.).

Montreal, Canada.
2004年3月22日-26日

H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda, I. Tsukada
"Frequency dependent microwave conductivity and superconducting fluctuation in
 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films"
2003 APS March Meeting (Bull. Am. Phys. Soc. 49 (2004) 1222.).
Montreal, Canada.
2004年3月22日-26日

M. Suzuki and M. Tonouchi
"Terahertz emitters based on ion-implanted $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ "
27th International Conference on the Physics of Semiconductors.
Arizona, USA.
2004年7月

I. Kawayama, Y. Doda, T. Miyadera, H. Murakami and M. Tonouchi
"AC current response of Josephson vortex flow transistors"
17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004).
Niigata, Japan.
2004年11月23日-25日

A. Maeda, Y. inoue, H. Kitano, S. Okayasu, I. Tsukada
"Study of kinetic friction of solid using driven vortex lattice in high-temperature
superconductors-a new route to study solid-solid friction"
17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004).
Niigata, Japan.
2004年11月23日-25日

T. Ohashi, H. Kitano, A. Maeda, R. Inoue
"Effect of thermal expansion in microwave conductivity measurement"
17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004).
Niigata, Japan.
2004年11月23日-25日

Masato Suzuki and Masayoshi Tonouchi
"Detection and Generation of Terahertz Radiated Field using InGaAs-based Photoconductive
Emitters and Detectors"
8th SANKEN international symposium & 3rd international symposium on scientific and
industrial nanotechnology.
Osaka, Japan.
2004年12月1日-2日

H. Murakami, K. Ueno, M. Tonouchi, T. Yasuda
"MO imaging of magnetic flux distribution in BSCCO single crystals"
Joint Workshop on Superconductivity, The Second CREST-NANOFAB Workshop NFS2004
& The XII-th Vortex Physics Workshop of Japan VPJ12

Osaka, Japan.
2004年12月1日-2日

A. Maeda
"Nano-scale riction: kinetic friction of magnetic flux quanta and charge-density waves"
JointWorkshop on Superconductivity, The 2nd CREST-NANOFAB Workshop NFS2004 &
The XIIth Vortex Phisics Workshop of Japan VPJ12
Osaka, Japan.
2004年12月1日-2日

M. Inoue, T. Kimura, K. Taniike and A. Fujimaki
"Study on the barrier formation of vertically-stacked interface-treated Josephson junctions"
2005 Japan-Taiwan Symposium on Superconductive Electronics.
Sapporo, Japan.
2005年2月9日-11日

H. Murakami, Y. Tominari, M. Tonouchi
"Terahertz Emission Properties of High- T_C Superconductors"
2005 Japan-Taiwan Symposium on Superconductive Electronics.
Sapporo, Japan.
2005年2月9日-11日

I. Kawayama, T. Miyadera and M. Tonouch
"Generation and Detection System of Sub-Terahertz Waves with Photomixer and High- T_C
Josephson Junction"
2005 Japan-Taiwan Symposium on Superconductive Electronics.
Sapporo, Japan.
2005年2月9日-11日

A. Maeda, H. Kitano, T. Ohashi, I. Tsukada
"Crossover from 2D-XY to 3D-XY superconducting fluctuations with hole-doping in
dynamical conductivity of $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ thin films by broadband technique"
2005 APS March Meeting (Bull. Am. Phys. Soc. 50-2 (2005) 932.).
Los Angeles, U. S. A.
2005年3月21日-25日

Y. Togawa, K. Harada, T. Akashi, H. Kasa, T. Matsuda, A. Maeda, A. Tonomura
"Vortex dynamics in superconducting ratchet in niobium thin film observed by Lorentz
microscopy"
2005 APS March Meeting (Bull. Am. Phys. Soc. 50-2 (2005) 168.).
Los Angeles, U. S. A.
2005年3月21日-25日

A. Maeda, H. Kitano, L. Gómez, T. Kubo, K. Ota and T. Ohashi
"High- T_C Josephson junction : towards improvement of I_cR_n product and realization of phase
qubits"
7th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2005)

Vienna, Austria

2005年9月11日-15日

I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi, T. Nishitani, M. Inoue and A. Fujimaki

"Design and demonstration of optical input interfaces for SFQ logic circuits"

18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005)

Tsukuba, Japan

2005年10月24日-26日

L. B. Gómez, T. Kubo, Y. Fukai, M. Inoue, A. Maeda and A. Fujimaki,

" I - V characterization of LSCO/YBCO ramp-edge junctions"

The 4th International Symposium on Nanotechnology

Tokyo, Japan

2006年2月20日-21日

A. Maeda, Y. Inoue, H. Kitano, I. Tsukada, S. Okayasu, S. Savelev, D. Nakamura and F. Nori

"Study of nano-scale kinetic friction using vortices in superconductors and charge-density waves"

2006 APS March Meeting

Baltimore, MD, USA

2006年3月13日-17日

H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda and I. Tsukada

"Anomalous dimensional crossover in critical microwave-conductivity fluctuations of superconducting $\text{La}_2\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films"

2006 APS March Meeting

Baltimore, MD, USA

2006年3月13日-17日

A. Maeda, H. Kitano, T. Ohashi and I. Tsukada

"Phase diagram of cuprate superconductors investigated by ac conductivity fluctuation measured by broadband technique"

The International Symposium on Anomalous Quantum Materials 2006 and the 5th

Asia-Pacific Workshop (ISAQUM2006 & The 5th APW)

Okinawa, Japan

2006年6月23日-27日

H. Kitano, T. Ohashi and A. Maeda

"Precise measurement of frequency-dependent complex conductivity of superconducting thin film near T_c "

Progress in Electromagnetics Research Symposium

Tokyo, Japan

2006年8月2日-5日

T. Ohashi, H. Kitano, A. Maeda and I. Tsukada

"Critical fluctuations in superconducting $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films studied by frequency dependent microwave conductivity"

Progress in Electromagnetics Research Symposium

Tokyo, Japan

2006年8月2日-5日

I. Kawayama, Y. Doda, H. Murakami and M. Tonouch

"Optical Responses of Josephson Vortex flow Transistor under irradiation of femtosecond laser pulses"

2006 International Conference on Solid State Devices and Materials

Yokohama, Japan

2006年9月12日-15日

I. Kawayama, Y. Doda, H. Murakami and M. Tonouch

"Study on femtosecond optical pulse responses of Josephson vortex flow transistors for an SFQ optical-input-interface"

19th International Symposium on Superconductivity (ISS2006)

Nagoya, Japan

2006年10月30日-11月1日

A. Maeda

"Scope of mini-symposium"

Mini-Symposium: Andreev reflection in anisotropic superconductors, 19th International Symposium on Superconductivity (ISS2006)

Nagoya, Japan

2006年10月30日-11月1日

L. B. Gómez, T. Kubo, S. Kitamura, H. Kitano and A. Maeda

"Electrical characterization of superconducting microbridge with ferromagnetic strip Josephson junctions"

The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)

Kyoto, Japan

2006年12月11日-13日

A. Maeda, T. Ohashi, H. Kitano, L. Gómez, I. Tsukada, A. Tsukada and M. Naito

"Magnetic field effect on the superconductivity fluctuation of cuprates, LSCO and LCCO measured by microwave broadband technique"

APS March meeting

Denver, Colorado, USA

2007年3月5日-9日

L. Gómez, S. Kitamura, T. Kubo, H. Kitano and A. Maeda

"Electrical characterization of superconducting microbridge Josephson junctions with ferromagnetic strip"

APS March meeting

Denver, Colorado, USA

2007年3月5日-9日

③ ポスター発表 (国内会議 2 件、国際会議 81 件)

[国内会議]

渡邊光弘, 木村大至, 林 孝信, 豊田浩孝, 菅井秀郎, 井上真澄, 藤巻 朗
"表面波プラズマを用いた積層ジョセフソン接合作製における表面改質条件の検討"
第68回応用物理学会学術講演会
札幌, 北海道工業大学
2007年9月4日-8日

井上真澄, 杉本 学, 梶野顕明, 藤巻 朗, 楠 正暢
"SFQ/光インターフェイス用YBCOナノブリッジの特性"
第68回応用物理学会学術講演会
札幌, 北海道工業大学
2007年9月4日-8日

[国際会議]

H. Kitano, R. Inoue, A. Maeda, N. Motoyama, K. Kojima, S. Uchida
"Nonlinear conductivity in the slightly hole-doped $\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ ladder compounds"
The 23rd International Conference on "Low Temperature Physics (LT23) "
Hiroshima, Japan.
2002年8月20日-27日

R. Inoue, H. Kitano, A. Maeda
"The inverse analysis of the enclosed cavity perturbation technique"
The 23rd International Conference on "Low Temperature Physics (LT23) "
Hiroshima, Japan.
2002年8月20日-27日

K. Kinoshita, Y. Inoue, Y. Tsuchiya, T. Umetsu, H. Kitano, A. Maeda, T. Hanaguri, T. Nishizaki, T. Sato, K. Shibata, N. Kobayashi
"Millimeter wave and microwave electrodynamic spectroscopy of $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{O}_y$ in the missner and mixed state"
The 23rd international Conference on "Low Temperature Physics (LT23) "
Hiroshima, Japan.
2002年8月20日-27日

K. Iwaya, T. Hanaguri, A. Koizumi, K. Takaki, A. Maeda, K. Kitazawa
"Electronic state of NbSe_2 investigated by STM/STS"
The 23rd international Conference on "Low Temperature Physics (LT23) "
Hiroshima, Japan.
2002年8月20日-27日

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"

9th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2003).
Sydney, Australia.
2003年7月7日-11日

I. Kawayama, Y. Doda, T. Miyadera, T. Kiwa, H. Murakami, and M. Tonouchi,
"Optically-Illuminated-Operation of High- T_c Superconducting Vortex Flow Transistors"
9th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2003).
Sydney, Australia.
2003年7月7日-11日

I. Kawayama, Y. Doda, T. Miyadera, T. Kiwa, H. Murakami, and M. Tonouchi,
"Optically controlled flux-flow-devices for SFQ circuits with high- T_c superconductors"
10th International Workshop on Oxide Electronics
Augsburg, Germany.
2003年9月11日-13日

I. Kawayama, Y. Doda, T. Miyadera, T. Kiwa, H. Murakami, and M. Tonouchi,
"New Optical Interface for Single Flux Quantum Devices with High- T_c Superconductors"
6th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2003)
Italy, Sorrento
2003年9月14日-18日

R. Inoue, H. Kitano, A. Maeda
"Investigation of a new technique to measure huge dielectric constant at microwave
frequencies using enclosed cavity perturbation method"
1st International Meeting on Applied Physics
Badajoz, Spain
2003年10月13日-18日

R. Inoue, K. Miwa, H. Kitano, A. Maeda
"Convenient and nondestructive measurement of dielectric function distribution of substrate at
microwave and millimeterwave frequencies using an open-ended coaxial resonator probe"
1st International Meeting on Applied Physics
Badajoz, Spain
2003年10月13日-18日

Y. Ishikawa, Y. Yoshinaga, M. Inoue, A. Fujimaki and H. Hayakawa
"Investigation of the Dispersion of the Barrier Thickness for Ramp Edge Josephson Junctions"
16th International Symposium on Superconductivity (ISS2003)
Tsukuba, Japan
2003年10月27日-29日

K. Kinoshita, H. Kitano, A. Maeda, T. Nishizaki, M. Maeda, K. Shibata, N. Kobayashi
"Impurity effect on the electronic state of the vortex core in the mixed state of $YBa_2Cu_3O_y$ "
16th International Symposium on Superconductivity (ISS2003)
Tsukuba, Japan
2003年10月27日-29日

Y. Tominari, Murakami, M. Tonouchi

"Terahertz Radiation Properties from Underdoped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Films"

East Asian Symposium on Superconductive Electronics (EASSE2003)

Taipei, Taiwan

2003年11月16日-20日

Y. Doda, T. Miyadera, T. Kiwa, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi

"Optical response of high- T_c superconductive vortex flow transistors"

East Asia Symposium on Superconductive Electronics.

Taipei, Taiwan

2003年11月16日-20日

Y. Tominari, H. Murakami, and M. Tonouchi

"Terahertz emission and transmission properties of oxygen deficient $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films"

The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2004

Karlsruhe, Germany

2004年7月26日-30日

M. Inoue, Y. Yoshinaga, K. Wakita, K. Taniike, A. Fujimaki, T. Kimura and H. Hayakawa

"Analysis of the barrier in vertically-stacked interface-treated junctions"

2004 Applied Superconductivity Conference (ASC2004)

Jacksonville, Florida, USA

2004年10月3日-7日

T. Kimura, K. Wakita, Y. Yoshinaga, K. Taniike, M. Inoue, A. Fujimaki and H. Hayakawa

"Vertically-stacked Josephson junctions using $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ as a counter electrode for improving uniformity"

2004 Applied Superconductivity Conference (ASC2004)

Jacksonville, Florida, USA

2004年10月3日-7日

M. Inoue, K. Taniike, T. Kimura and A. Fujimaki

"Study on the Barrier Formation of Vertically-Stacked Interface-Treated Junctions"

17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004)

Niigata, Japan

2004年11月23日-25日

T. Miyadera, I. Kawayama, T. Kiwa, K. Tsukada, M. Tonouchi

"Generation and detection system of tunable sub-terahertz electromagnetic waves using a photomixer and a high- T_c Josephson junction"

17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004)

Niigata, Japan

2004年11月23日-25日

H. Murakami, K. Ueno, I. Kawayama, M. Tonouchi, T. Yasuda, S. Adachi, K. Tanabe

"Magneto-Optical Imaging of Magnetic Flux Distribution in High- T_c Superconductors"

The 17th International Symposium on Superconductivity (ISS2004)

Niigata, Japan

2004年11月23日-25日

H. Murakami, K. Ueno, M. Tonouchi, T. Yasuda

"Magneto-optical Imaging of magnetic flux distribution in HTSCs"

Vortex Matter in Nanostructured Superconductors

Crete, Greece

2005年9月3日-9日

T. Kimura, K. Taniike, T. Inoue, T. Nishitani, M. Inoue and A. Fujimaki

"In-situ Preparation Process for Vertically-Stacked Josephson Junctions Using $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Counter Electrodes"

10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2005)

Noordwijkerhout, The Netherlands

2005年9月5日-9日

M. Inoue, K. Taniike, T. Kimura, T. Inoue and A. Fujimaki

"A New Process for Fabricating Vertically-Stacked YBCO Josephson Junctions"

10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2005)

Noordwijkerhout, The Netherlands

2005年9月5日-9日

Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami, and M. Tonouchi

"AC current response of Josephson Vortex Flow Transistor using YBCO bicrystal grain boundary junctions"

10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2005)

Noordwijkerhout, The Netherlands

2005年9月5日-9日

I. Kawayama, H. Murakami, and M. Tonouchi

"Detection of sub-terahertz photomixing signals with a YBCO Josephson junction"

10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2005)

Noordwijkerhout, The Netherlands

2005年9月5日-9日

I. Kawayama, R. Kinjo, H. Murakami, M. Tonouchi, T. Nishitani, M. Inoue and A. Fujimaki

"Demonstration of an optical input interface for a SFQ logic circuit with YBCO thin films"

10th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2005)

Noordwijkerhout, The Netherlands

2005年9月5日-9日

H. Murakami, K. Ueno, M. Tonouchi, T. Yasuda

"Developments of Magneto-Optical Imaging Systems for Evaluation of Vortex States in High-TC Superconductors"

7th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2005)

Vienna, Austria

2005年9月11日-15日

A. Maeda, H. Kitano, L. Gomez, T. Kubo, K. Ota, and T. Ohashi
"High- T_c Josephson junction : towards improvement of $I_c R_n$ product and realization of phase qubits"
7th European Conference of Applied Superconductivity (EUCAS2005).
Vienna, Austria.
2005年9月11日-15日

M. Inoue, T. Kimura, K. Taniike, T. Inoue and A. Fujimaki
"Vertically-Stacked Interface-Treated Josephson Junction Fabricated by New In-Situ Process"
18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005)
Tsukuba, Japan
2005年10月24日-26日

Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi
"High frequency response of Josephson vortex flow transistors"
18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005)
Tsukuba, Japan
2005年10月24日-26日

H. Murakami, Y. Doda, Kawayama, and M. Tonouchi
"Development of laser-MO detection system of local magnetic flux quantum states"
18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005)
Tsukuba, Japan
2005年10月24日-26日

R. Kinjo, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi
"Sub-THz wave generation and detection system using YBCO Josephson junction coupled with coplanar wave-guide"
18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005)
Tsukuba, Japan
2005年10月24日-26日

K. Ota, H. Kitano and A. Maeda
"Escape rate from the zero-voltage state in the intrinsic josephson junctions of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ "
18th International Symposium on Superconductivity (ISS2005)
Tsukuba, Japan
2005年10月24日-26日

M. Inoue, T. Nishitani, I. Kawayama, K. Sawaki, A. Fujimaki, H. Murakami and M. Tonouchi
"Design and Demonstration of the Optical Input Interface for SFQ Circuits"
The Third East Asia Symposium on Superconductive Electronics (EASSE2005)
Gyeongju, Korea
2005年11月15日-18日

I. Kawayama, T. Miyadera, R. Kinjo, H. Murakami and M. Tonouchi
"Detection of Sub-Terahertz Photomixing Signals with a Superconducting Detector"
International Workshop on THz Technology 2005
Osaka, Japan
2005年11月16日-18日

L.B. Gómez, T. Kubo, H. Kitano and A. Maeda
"Tailoring the oscillating frequency of Josephson junctions"
International Workshop on THz Technology 2005
Osaka, Japan
2005年11月16日-18日

M. Inoue, T. Nishitani, T. Yamada, K. Sawaki, I. Kawayama, A. Fujimaki and M. Tonouchi
"Study on the optical input interface for Nb single-flux-quantum circuits"
CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)
Awaji, Japan
2005年12月20日-22日

T. Nishitani, I. Kawayama, R. Kinjo, Y. Fukai, T. Kimura, M. Inoue, M. Tonouchi and A. Fujimaki
"Study on the optical input interface for HTS SFQ circuits"
CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)
Awaji, Japan
2005年12月20日-22日

Y. Fukai, T. Nishitani, T. Kimura, M. Sugimoto, M. Inoue and A. Fujimaki
"Characteristics of ramp-edge Josephson junctions using Ca-doped YBa₂Cu₃O_{7-x} with different doping levels"
CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)
Awaji, Japan
2005年12月20日-22日

T. Kimura, T. Nishitani, M. Watanabe, M. Sugimoto, Y. Fukai, M. Inoue and A. Fujimaki
"Characteristics of Double-Josephson Junctions Based on high Temperature Superconductor"
CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)
Awaji, Japan
2005年12月20日-22日

M. Sugimoto, T. Kimura, T. Nishitani, Y. Fukai, M. Inoue and A. Fujimaki
"Formation of barrier layers of HTS vertically-stacked Josephson junctions using RF plasma"
CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)
Awaji, Japan
2005年12月20日-22日

M. Kusunoki, S. Ohta, M. Tamiya, H. Nishikawa, S. Hontsu, I. Kawayama, M. Tonouchi and A. Fujimaki
"Fabrication of HTS nano-bridges for SFQ-optics converter"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日-22日

Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi

"Characteristics of Josephson Vortex Flow Transistor using YBCO bicrystal grain boundary junctions"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日-22日

R. Kinjo, I. Kawayama, H. Murakami, T. Kiwa, M. Tonouchi

"Optical Signal Detection System using YBCO Josephson Junction Coupled with Coplanar Wave-guide"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日-22日

Masayoshi Tonouchi, Hironaru Murakami

"Development of prototype of laser magneto-optical imaging system"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日-22日

M. Inoue, T. Nishitani, T. Yamada, K. Sawaki, I. Kawayama, A. Fujimaki and M. Tonouchi

"Study on the optical input interface for Nb single-flux-quantum circuits"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日-22日

T. Ohashi, H. Kitano, A. Maeda and I. Tsukada

"Critical fluctuation in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films studied by dynamic scaling analysis of microwave conductivity"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日-22日

H. Kitano, K. Ota and A. Maeda

"Switching current distribution of Bi-2212 intrinsic multi Josephson junctions"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日-22日

L.B. Gómez, T. Kubo, Y. Fukai, M. Inoue, A. Maeda and A. Fujimaki

"Electrical characterization of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ramp-edge junctions"

CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2005)

Awaji, Japan

2005年12月20日-22日

L.B. Gómez, T. Kubo, H. Kitano, Y. Fukai, M. Inoue, A. Maeda and A. Fujimaki

"I-V characterization of LSCO/YBCO ramp-edge junctions"

The 4th International Symposium on Nanotechnology

Tokyo, Japan

2006年2月20日-21日

R. Kinjo, I. Kawayama, H. Murakami, T. Kiwa, M. Tonouchi

"Detection of Photomixing Signals Using YBCO Josephson Junction Coupled with Coplanar Wave-guide"

2006 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference

Kobe, Japan

2006年4月24日-26日

H. Murakami, I. Kawayama, M. Tonouchi

"Development of a highly sensitive magneto-optical system for magnetic flux detection"

8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M²S-HTSC-VIII)

Dresden, Germany

2006年7月9日-14日

H. Murakami, M. Tonouchi

"Control of magnetic fluxes in YBCO strip line by femtosecond optical pulse"

8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M²S-HTSC-VIII)

Dresden, Germany

2006年7月9日-14日

H. Murakami, Y. Tominari, M. Tonouchi

"THz-pulse radiation phenomena of High-Tc Superconductors by ultrashort optical pulse illumination"

8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M²S-HTSC-VIII)

Dresden, Germany

2006年7月9日-14日

A. Maeda, Y. Inoue, H. Kitano, I. Tsukada, S. Okayasu, S. Savel'ev, D. Nakamura and F. Nori,

"Study of physics of friction using dynamics of driven vortices in superconductors and charge-density waves"

8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M²S-HTSC VIII)

Dresden, Germany

2006年7月9日-14日

A. Maeda, T. Umetsu and H. Kitano

"Viscosity and flux flow of quantized vortex of high- T_c superconductors $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ as a function of carrier concentration"

8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M²S-HTSC VIII)

Dresden, Germany

2006年7月9日-14日

H. Kitano, K. Ota and A. Maeda

"Switching current distribution in large $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic Josephson junctions"

8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M²S-HTSC VIII)

Dresden, Germany

2006年7月9日-14日

H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda and I. Tsukada

"Kosteritz-Thouless type of superconducting phase fluctuations investigated by frequency-dependent microwave conductivity of underdoped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films"

8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M²S-HTSC VIII)

Dresden, Germany

2006年7月9日-14日

T. Ohashi, H. Kitano, A. Maeda and I. Tsukada

"Carrier concentration dependence of critical fluctuations in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films"

8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M²S-HTSC VIII)

Dresden, Germany

2006年7月9日-14日

H. Kitano, K. Ota and A. Maeda

"Superconducting cavity resonator with a metallic tip for realizing strong coupling between superconducting qubits and microwave photons"

24th International Conference on Low temperature Physics (LT-24)

Orlando, Florida, USA

2006年8月10日-17日

H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda and I. Tsukada

"Dynamic scaling analysis of ac fluctuation microwave conductivity in superconducting $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films"

24th International Conference on Low temperature Physics (LT-24)

Orlando, Florida, USA

2006年8月10日-17日

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"

2006 Applied Superconductivity Conference (ASC2006)

Seattle, Washington, USA
2006年8月27日-9月1日

T. Kimura, T. Nishitani, M. Sugimoto, Y. Fukai, M. Inoue, A. Fujimaki and M. Watanabe
"Fabrication of inductively-coupled double-Josephson junctions using high-temperature superconductors"
2006 Applied Superconductivity Conference (ASC2006)
Seattle, Washington, USA
2006年8月27日-9月1日

M. Kusunoki, S. Ohta, H. Nishikawa, S. Hontsu, I. Kawayama, M. Tonouchi and A. Fujimaki
"HTS nano-bridges for SFQ-optics converter"
2006 Applied Superconductivity Conference (ASC2006)
Seattle, Washington, USA
2006年8月27日-9月1日

Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami and M. Tonouchi
"Optical responses of a Josephson vortex flow transistor under the irradiation of femtosecond laser pulses"
2006 Applied Superconductivity Conference (ASC2006)
Seattle, Washington, USA
2006年8月27日-9月1日

I. Kawayama, Y. Fukai, T. Nishitani, M. Inoue, A. Fujimaki, H. Murakami and M. Tonouchi
"Development of optical input interface for SFQ logic circuits with YBCO thin films"
2006 Applied Superconductivity Conference (ASC2006)
Seattle, Washington, USA
2006年8月27日-9月1日

I. Kawayama, R. Kinjo, T. Miyadera, T. Kiwa, H. Murakami and M. Tonouchi
"Development of optical input interface for SFQ logic circuits with YBCO thin films"
2006 Applied Superconductivity Conference (ASC2006)
Seattle, Washington, USA
2006年8月27日-9月1日

M. Inoue, T. Yamada, M. Terabe, Y. Fukai, K. Sawaki, A. Fujimaki, I. Kawayama and M. Tonouchi
"Optical Input Interface for Nb Single-Flux-Quantum Circuits"
19th International Symposium on Superconductivity (ISS2006)
Nagoya, Japan
2006年10月30日-11月1日

K. Kajino, M. Sugimoto, M. Inoue, A. Fujimaki, I. Kawayama and M. Tonouchi
"Optical Output Interface Using Magneto-Optical Effect for SFQ Circuit"
The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)
POS04
Program and Abstracts pp.85-86

Kyoto, Japan
2006年12月11日-13日

S. Ohta , M. Kusunoki, H. Nishikawa, S. Hontsu, I. Kawayama, M. Tonouchi and A. Fujimaki
"Improvement of fabrication process for HTS nano-bridges"
The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)
Kyoto, Japan
2006年12月11日-13日

Y. Fukai, I. Kawayama, T. Kimura, M. Sugimoto, K. Kajino, M. Inoue, A. Fujimaki and M. Tonouchi
"Study on the optical input interface circuit using HTS ramp-edge interface-engineered junctions"
The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)
Kyoto, Japan
2006年12月11日-13日

M. Inoue, T. Yamada, N. Irie, Y. Fukai, K. Sawaki, I. Kawayama, A. Fujimaki and M. Tonouchi
"Study on the optical input interface for Nb single-flux-quantum logic circuits using photomixing"
The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)
Kyoto, Japan
2006年12月11日-13日

T. Kimura, M. Watanabe, M. Sugimoto, Y. Fukai, K. Kajino, M. Inoue and A. Fujimaki
"Microstructure of the barrier layer of vertically-stacked Josephson junctions fabricated using different processes"
The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)
Kyoto, Japan
2006年12月11日-13日

M. Sugimoto, T. Kimura, Y. Fukai, K. Kajino, M. Watanabe, M. Inoue and A. Fujimaki
"Fabrication of YBCO nano-bridges for SFQ circuit application"
The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)
Kyoto, Japan
2006年12月11日-13日

M. Watanabe, T. Kimura, T. Hayashi, H. Toyoda, M. Inoue and A. Fujimaki
"Fabrication of Josephson junctions with an interface layer modified by surface wave plasma"
The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)
Kyoto, Japan
2006年12月11日-13日

T. Okumura, S. Kitamura, T. Kubo, Y. Fukai, L.B. Gómez, H. Kitano, M. Inoue, A. Maeda and A. Fujimaki
"Characteristics of Ramp-Edge Josephson Heterojunctions with Varying Carrier

Concentrations"

The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)

Kyoto, Japan

2006年12月11日-13日

I. Kawayama, Y. Fukai, M. Inoue, A. Fujimaki, H. Murakami, M. Tonouchi

"Demonstration of optical interfaces for SFQ logic circuits"

The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)

Kyoto, Japan

2006年12月11日-13日

Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi

"Optical response of Josephson vortex flow transistors"

The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)

Kyoto, Japan

2006年12月11日-13日

L. B. Gomez, T. Kubo, S. Kitamura, H. Kitano and A. Maeda

"Electrical characterization of superconducting microbridge with ferromagnetic strip Josephson junctions"

The 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006)

Kyoto, Japan

2006年12月11日-13日

I. Kawayama, Y. Doda, H. Murakami, M. Tonouchi, M. Inoue, A. Fujimaki

"Demonstration of an optical interface for SFQ logic circuits"

8th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2007)

Brussels, Belgium

2007年9月16日-20日

Y. Doda, I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi

"Superconducting Optical Input Device with Optically-Generated Vortices"

The 14th International Workshop on Oxide Electronics

Jeju island, Korea

2007年10月7日-10日

(4)特許出願

①国内出願 (4 件)

1. 名称：光-磁束変換型入力インターフェース回路

発明者：川山巖、斗内政吉、藤巻朗

出願人：科学技術振興事業団

出願日：平成15年6月6日

出願番号：特願2003-162552

2. 名称：ジョセフソン接合の作製方法，及びジョセフソン接合
発明者：谷池浩一郎，井上真澄，藤巻朗
出願人：独立行政法人 科学技術振興機構
出願日：平成17 (2005)年2月4日
出願番号：特願2005-28917
3. 名称：ジョセフソン接合およびジョセフソンデバイス
発明者：前田京剛，ゴメス・エスピノーザ・ルイス・ベルトラン
出願人：独立行政法人科学技術振興機構
出願日：2006年7月20日
出願番号：特願2006-332346（国内優先権主張：原出願2006-198705）
4. 名称：ジョセフソン接合およびジョセフソンデバイス
発明者：前田京剛，ゴメス・エスピノーザ・ルイス・ベルトラン
出願人：独立行政法人科学技術振興機構
出願日：2006年7月20日
出願番号：特願2006-198705

②海外出願（1件）

1. 名称：ジョセフソン接合およびジョセフソンデバイス
発明者：前田京剛，ゴメス・エスピノーザ・ルイス・ベルトラン
出願人：独立行政法人科学技術振興機構
出願日：2006年7月20日
出願番号：PCT/JP2007/064321

(5)受賞等

①受賞

藤巻朗：
第8回超伝導科学技術賞 2004年6月

田仲由紀夫：
第9回超伝導科学技術賞 2005年6月

M. Inoue（共同研究者 T. Nishitani, I. Kawayama, K. Sawaki, A. Fujimaki, H. Murakami, M. Tonouchi）：
Best Poster Award at the Third East Asia Symposium on Superconductive Electronics (EASSE2005), "Design and Demonstration of the Optical Input Interface for SFQ Circuits", 2005年11月18日

堂田泰史(共同研究者 川山巖、村上博成、斗内政吉)：
2006年度低温工学・超伝導関西若手奨励賞、"磁束量子フロートランジスタの光応答計測"，2006年12月7日

Y. Doda (共同研究者 I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi) :
Best Poster Award at 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity
(NVLS2006), "Optical response of Josephson vortex flow transistors", 2006年12月13日

②新聞報道

なし

③その他

なし

7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H14.12.26	チームミーティング	名古屋大学	18名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H15.8.5	チームミーティング	名古屋大学	23名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H16.1.15	チームミーティング	大阪大学	18名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H16.5.7	チームミーティング	名古屋大学	6名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H16.7.12	チームミーティング	東京大学	20名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H17.6.20	チームミーティング	名古屋大学	20名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H17.11.3	チームミーティング	大阪大学	6名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H17.12.20 ~H17.12.22	NVLS2005	淡路夢舞台	125名	領域横断企画(福山領域・石田チーム、藤嶋領域・松本チームと共催)による国際ワークショップ。ボルテックスの運動を中心に検討。
H18.11.10	チームミーティング	東京大学	15名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討

H18.12.11 ～H18.12.13	NVLS2006	京都リサーチパーク	110名	領域横断企画(福山領域・石田チーム、藤嶋領域・松本チームと共催)による国際ワークショップ。ポルテックスの運動とセンサ応用を中心に検討。
H19.4.17	チームミーティング	名古屋大学	6名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H19.8.21	チームミーティング	大阪大学	6名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H19.8.28	チームミーティング	名古屋大学	4名	チーム内の研究進捗確認と協力関係を含む研究の方向性の検討
H19.10.21 ～H19.10.22	NVLS2007-SS	さかい新事業創造センター S-CUBE	50名	領域横断企画(福山領域・石田チームと共催)による国際ワークショップ。検出器応用を中心に検討。
H19.12.17 ～H19.12.18	NVLS2007-CC	北九州国際会議場	50名	領域横断企画(福山領域・石田チーム、藤嶋領域・松本チームと共催)による国際ワークショップ。ポルテックスの運動を中心に検討。

8 研究成果の展開

(1)他の研究事業への展開

該当なし

(2)実用化に向けた展開

該当なし

9 他チーム、他領域との活動とその効果

(1)領域内の活動とその効果

大谷グループの多価イオンプロセスが本研究のジョセフソン接合作製プロセスに活かせるかどうかを検討した。非常に均質な表面改質は可能と判断したが、時間的、人的余裕がなく、実施には至らなかった。

(2)領域横断的活動とその効果

これまで領域横断企画の支援を受け、2005年、2006年と2回にわたり、福山領域・石田チーム、藤嶋領域・松本チームとともに国際ワークショップを開催してきた。キーワードは、超伝導とボルテックスであり、計算科学を含む基礎物理の専門家、検出器の専門家、それに我々、エレクトロニクスの専門家が一堂に会し、「ボルテックスを見る」、「ボルテックスの動きを解析する」、「ボルテックスを生成する」、「ボルテックスの動きを制御する」といった一連の科学技術の議論を深めた。その結果、我々のナノブリッジの技術、もしくは接合技術も高エネルギー分解能の粒子検出器やテラヘルツ電磁波検出器として展開できる可能性が見出された。また、SFQ回路で複数の検出器を多重化することも可能である。その多重化回路は比較的簡単であるため、本研究の成果である高温超伝導ジョセフソン接合の適用も可能である。検出器応用の研究内容は、本研究の光入力回路と直接的に合致するが、本研究期間中はあくまでも光入力回路としての応用を目指し、研究を進めている。この2回のワークショップで言えば「ボルテックス工学」と言う新しいコミュニティが構成されたが、今後、本研究チームメンバーはこのコミュニティの活動・発展に積極的に協力し、本研究の成果を生かす道の1つとしたいと考えている。なお、領域横断企画に関しては2007年も2回にわたり、ワークショップを開催する予定である。

10 研究成果の今後の貢献について

(1) 科学技術の進歩が期待される成果

すでに述べたように、本研究では、新しい知見や世界で初めてとなるデモンストレーションが複数含まれている。高温超伝導ジョセフソン接合については、これまででもっとも高い周波数である500GHzで動作する分周回路のデモンストレーションに成功した。ポテンシャル的には1THzを超える動作が期待でき、現在その実現を試みているところである。実現すれば、Nb-SFQ回路あるいは半導体回路では到達し得ない論理回路としての性能を初めて世に示すことになり、高温超伝導体の論理デバイス応用が再び展開されるものと考えている。このデモンストレーションは、高温超伝導ジョセフソン接合に関するさまざまな方面からの研究の賜物であり、それはテラヘルツ集積回路へ向けた第一歩となっているものと信じている。

一方、前田グループが実施した磁性体付着弱結合デバイスは、超伝導の専門家である我々

の予想を超えた結果を示した。強磁性体が薄膜の近傍に置かれるだけで、素子がトンネル伝導的に振る舞いジョセフソン効果を示したことは、高温超伝導材料と磁性材料の組み合わせによって、新たなデバイスが創製されることを期待させる。たとえば、記憶機能を単体のデバイスの中に内包した効果など、さまざまな展開の可能性があり、引き続きメカニズムの解析は必要であるが、超伝導スピエレクトロニクスの分野の創出に繋がる成果と考える。

ナノブリッジの形成には、極低損傷加工技術の開発などが伴っている。この技術は、最近の5年間に急速に進化した超伝導ナノワイヤによる単一光子検出素子や粒子検出器への応用へ繋がるものと期待している。特に多素子化が容易なカイネティックインダクタンス検出器への応用には、本研究で実施した LSCO の相図の構築や、元素置換によるキャリア数、臨界温度の制御が直接的に関与するものと思われる。このような観点をもとにした検出器研究はこれまで実施例がないことから、研究アプローチとして斬新なものになると期待している。

SFQ 光入出力技術に関しては、2006 年頃から複数の研究プロジェクトによって研究が活発化された。その中で本研究の斗内グループの成果はさきがけ的な存在となっている。SFQ 回路の光による入出力技術は、たとえ低速であっても、熱流入抑制の問題から重要な技術となってきている。Nb-SFQ 回路が順調に集積度を上げてきている現在、本研究で最終的に到達した熱の問題のない直接照射入力回路、MO 効果を利用した出力回路は、近未来のシステムに取り入れられていくものと考えている。

(2)社会・経済の発展が期待される成果

本研究で最終的に目指す SFQ テラヘルツ集積回路については、さらなるばらつき低減化など本格的な実用化へは幾つかの課題が残されている。したがって、ジョセフソン接合の物理も含め、当面は基礎的な研究を中心に課題を1つ1つ克服していく段階にあると認識している。

一方、比較的近い実用化は検出器への応用である。とりわけ、カイネティックインダクタンス検出器はマルチピクセル化に適しており、高感度 X 線イメージャやテラヘルツ電磁波イメージャといった分野への展開が期待できる。これについては領域横断企画で構築された新しいコミュニティのメンバーとも協力しながら、開発を進めていく予定である。

11 結び

個々のグループの各研究項目の達成度については、「3. 研究実施内容及び成果」の欄に記載し、自己評価についても5段階で行っている。その平均を100点満点に換算すると88点となる。全体的に見れば、未達成の項目もあるものの、概ね目標は達成し、また新しい試みもあったことから、妥当な自己評価と考える。

SFQ 基礎グループの前田・田仲らとは、本 CREST 研究によって、初めて同じ方向性の研究を行った。主に発表する学会も、藤巻、斗内、楠は応用物理学会であり、前田、田仲は物理学会と異なる。研究手法や興味の対象もそれぞれ微妙に異なったが、逆にそれぞれのグループには良い刺激になったものとする。すなわち本研究の遂行によって、最終目標さえコンセンサスを取っておけば、さまざまなアプローチがあった方が、結局はうまく行くことを再認識させられた。人的交流も活発になり、特に学生が他大学に行って測定や議論をする機会が増えたことは、視野を広げるという意味で研究成果以上に重要な成果と考えている。

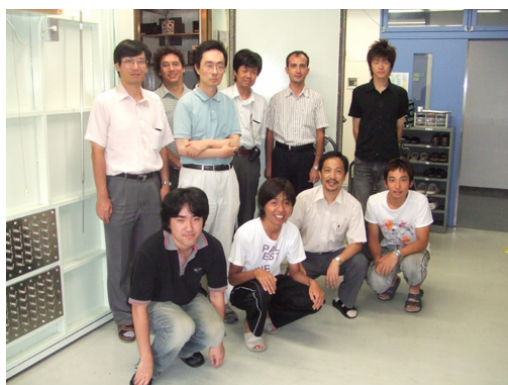
人的交流に関しては、領域内ミーティングはもちろんであるが、楯領域統括の勧めもあり始めた他の領域の CREST チームとのワークショップが、非常に重要な役割を果たした。海外の要人を含め物理学会、応用物理学会、電気学会、天文学会と異なるフィールドに立つ研究者が一堂に会し、深く議論する機会は、これまで設定されたことがなかった。この機会を4回(うち2回は予定)も持つことができたことは、非常に幸運であったと感じている。分野が違っていた内容でも、意外なところで自身の研究と関係しているなど、発見の連続であった。超伝導検出器を中心とした新たな学際・複合領域が開拓されるのは、間違いないと考えている。本研究の成果の展開先としても、検出器応用は有望なもの1つである。学生の中にはこのワークショップの運営に携わることで、世界の

一線の研究者と普段着の会話が進み、その結果、博士課程への進学を決めたものや、研究内容を変更したものもあり、教育的な観点からも意味は大きかったと感じている。

予算については、事務局が研究者の立場に立って管理していただいたため、非常に使いやすい状況で4年間を過ごした。2007年度は受託研究となってしまったため、チーム内の予算の移動などができず、柔軟性に乏しい運営を強いられている。チーム型研究であることを尊重し、柔軟性を確保した予算の執行方法などを検討していただければ幸いである。

5年間のCREST研究を通して感じたことは、前述したように好奇心の強い研究者の真剣な交流が、一見無駄に見えて、次へのステップの大きな礎になっているということである。最後に、このような機会を与えてくださったJSTの皆様、また超伝導という実用化に対し不透明な技術に対してもご支援・ご指導をくださった領域統括およびアドバイザーの先生方、さらにはさまざまな刺激をいただいた領域内他チームの皆様、領域横断企画協力チームの皆様がこの場を借りて、深く感謝の意を表します。

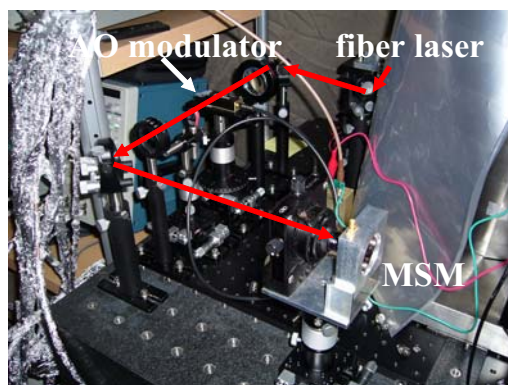
なお、以下に幾つかの写真を添付いたします。



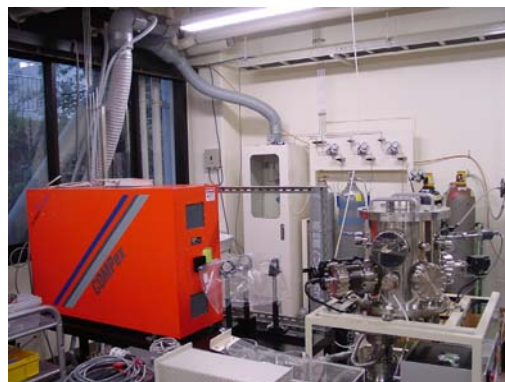
藤巻チームミーティング集合写真
後ろは藤巻研・シールドルーム



領域横断ワークショップ NVLS2006@京都



斗内研・光入射装置



前田研・レーザー蒸着装置