

第 71 回応用物理学会春季学術講演会報告

大分類 11 超伝導

11 超伝導大分類では, 18 件のポスター発表があり, 69 件の口頭発表があった.

11.1 デバイス系 筑波大 柏木

2024 年 3 月 23 日午前の「基礎物性 (デバイス系)」では, 6 件の口頭発表があった。内訳として, Bi2212 固有ジョセフソン接合デバイスに関する研究が 4 件, YBCO 薄膜をベースとした接合に関する研究が 2 件であった。

Bi2212 固有ジョセフソン接合デバイスに関する研究に関しては, 筑波大学と京都大学のグループから報告があった。筑波大の柏木らは発振素子の形状と出力特性に関する研究について報告を行い, 素子形状と発振周波数の相関について報告した。筑波大学の南らは, Bi2212 アレイ構造について, パルス電圧動作にて高出力化する試みや, 配線用電極の改善などから素子特性の再現性の改善などを報告した。京大の小林らは, LT-spice を用いたシミュレーションにより, 実験結果を高く再現できることを示すとともに, 素子の発振出力に関して理論的な最大値の検証などを行い, 柔軟なモデル解析が可能であることを説明した。同じく京大の宮本らは, 発振素子の周波数変調において, 重畳する変調信号の周波数が, 発振スペクトルに及ぼす変化を解析することで, 固有ジョセフソン接合における接合同期の緩和時間について議論を行った。

YBCO 薄膜をベースとした接合に関する研究に関しては, まず京大の掛谷らにより, YBCO 薄膜と強磁性薄膜の接合界面における超伝導電子密度について, THz-TDS を用いた評価から議論が行われた。続いて産総研の三澤らは, YBCO 薄膜に He-FIB ビームを照射することで作製したジョセフソン接合の特性及びその接合のエレクトロマイグレーション効果の評価から, YBCO 接合の特性が電気的手法で事後調整できることを報告した。

11.1 材料系 山梨大 長尾

「基礎物性 (材料系)」では, 16 件の口頭発表があった。

銅酸化物超伝導体関連 6 件, 鉄系超伝導体関連 4 件, ニッケル系酸化物超伝導体関連 1 件, その他の超伝導体 5 件の講演があった。これに加え, 基礎物性(材料系)として 8 件のポスター発表があった。

Fe 系超伝導体をはじめとする O サイトを F で置換することによって発現する超伝導体において, F の置換量を見積もることは非常に難しいが, GdFeAsO 系において, 試料の格子定数から Vegard's law (ベガード則)を用いた F 置換量の見積もりが有効であることが報告された。FeSe 超伝導体においてバルクと比べ高い超伝導転移温度が観測されている

極薄膜について磁場中での輸送特性に関する研究で、温度によって超伝導性の 2D-3D クロスオーバーが起きている可能性が報告された。層状ペロブスカイト酸砒化物について、機械学習を用いることで、安定相が形成される化合物の候補が報告された。DAC(ダイヤモンドアンビルセル)を用いた高圧下での新規超伝導体に関する発表があった。その中で、一つのサイトを多数の元素で置換した高い混合エントロピーを有する(ハイエントロピー合金のコンセプトを導入した)化合物における超高压下での超伝導転移温度の安定性の起源を調べた発表があり、状態密度(DOS)の周波数依存性が影響している可能性について報告があった。最近、高い超伝導転移温度が報告されているニッケル系酸化物超伝導体の合成に関する発表があり、高酸素圧下での熱処理などが有効であることが報告された。Cu-1212銅酸化物超伝導体にAuを置換する高圧合成に関する研究で、Auは目的相には導入できなかったがAu³⁺という形のAuの酸化物が生成されることが報告された。Y-247相の常圧での酸素アニールにおいて得られる最大の超伝導転移温度は92.5 K付近であるといった報告があった。Dyを一部置換したY-123の磁場配向に関する研究において、0.8 T程度の永久磁石でも磁場配向が可能であることが報告された。また、ポスター発表においてハイエントロピー合金の超伝導体における磁束ピン止めに関する発表があり、Poster Awardの候補としてノミネートされた。

11.2 関西学院大 尾崎

「薄膜，厚膜，テープ作製プロセスおよび結晶成長」では3月22日午前に3件のオンラインでのポスター発表と9月23日午後15時のハイブリットでの口頭発表があった。合計15件の口頭発表の内、2件はオンライン講演であった。内訳は、RE系超伝導膜で10件、Bi系超伝導膜で1件、NiO系超伝導膜で1件、NbTiN膜で2件、導電性中間層で1件、その他で3件であった。そのうちのいくつかの講演について以下に紹介する。坪田(北九州高専)らは、NbSe₃を用いたトポクティック反応によってNbSe₂結晶の合成を行った。その結果、大気中で加熱すると、組成がNb₂O₅に変化してしまうが、750°C、7×10⁻³ Paで加熱すると、40分でSeが抜けて新しい結合が生じることでNbSe₂結晶ができると報告した。牧瀬(国立天文台)らは、Si(100)基板にγ-Mo₂Nをバッファ層として成膜したNbTiN膜の評価を行った。Moターゲットを用いてArとN₂の混合ガス中でDCマグネトロンスパッタ法によって成膜すると、γ-Mo₂Nとして200配向が確認できた。このMoNをバッファ層としてNbTiN膜を作製すると200配向し、T_c=15.5 Kを示したと報告した。下山(青山学院大)らは、新規なフッ素フリーのMOD原料について報告した。原料の調整は、非常に容易であり、金属組成の制御も原料の焼結体に依存することから実用性に富むものと期待される。具体的には対象物質の焼結体、あるいは粉末をプロピオン酸に溶解し、その後、ゲル化させ、加熱しプロピオン酸塩粉末を作製する。これをメタノールとブタノールの混合溶液に溶解し、原料溶液を得た。作製したGdBa₂Cu₃O₇ (Gd123)薄膜の表面は平坦であることも大きな特徴である。また、この手

法は様々な酸化物にも適用できるとのことである。山崎(名大)らおよび堀尾(九工大, JST-CREST)らは, PLD法におけるレーザープルームの形状制御手法の開発およびプルーム像からのプロセス条件推定法について報告した。デプスカメラを用いてプルームの高さを認識し, 変化が生じた際に自動で集光レンズ位置を調整することでプルーム形状をある程度一定に保つことができることを示した。画像解析については, 同じ撮像位置であれば非常に高い精度でプロセス条件ごとの分類が可能であることが示された。一方, 撮像位置が異なる場合に誤分類が増加するが, エッジ等に基づく位置合わせの前処理を行うことで改善することが報告された。

11.3 九州産業大 末吉

「臨界電流・超伝導パワー応用」では, 3月23日午前に10件の口頭発表があった。奥村(名大)らは, SrTiO_3 と CeO_2 を組み合わせたナノコンポジットバッファ層を用いて, YBCO薄膜の面内配向制御によるピン止め点の導入を試み, ナノコンポジットバッファ層により磁場中の J_c は増加したが, 目論見とは異なり YBCOは全体的にcube-on-cubeで結晶成長したことを報告した。加藤(名大)らは, 高温超伝導薄膜の面内方向の量子化磁束の線張力を評価するようにパターン加工し, 量子化磁束の長さ方向の上下の電圧端子で測定した抵抗率の違いから, 長さ方向の相関長がミクロンオーダーであることを評価し, またこの現象を利用して, 薄膜にマイクロパターンを加えることでデバイス化の可能性があることを報告した。末吉(九産大)らは, 重イオン照射した人工ピン入り高温超伝導線材の磁化緩和特性を調べ, フラックスジャンプの影響のない30K以上の温度領域においてナノ粒子によって磁束クリープが抑制されている振る舞いがあることを報告した。濱本(九工大)らは, 高温超伝導線材自身をツイストすることで自己磁界を縦磁界として印加されることを3つのメーカーの線材で試み, 全ての線材において縦磁界効果特有の磁場に対する J_c のピークが現れ, J_c が増加することを報告した。伊藤(名大)らは, Vapor-Liquid-Solid成長法で作製した膜厚の異なるYBCO厚膜において縦磁場下の臨界電流密度を調べ, 膜厚の厚い試料ほど縦磁場効果特有の磁場に対する J_c のピークが高磁場側にシフトし, J_c が増加することを報告した。温(九工大)らは, AFI数値積分法を用いたTDGL方程式により, 量子化磁束の可逆運動を可視化し, その磁束分布は理論的に予測された磁場侵入の様子と一致することを報告した。呉(九大)らは, 機械学習を組み込んだリアルタイム式磁気顕微鏡観察を用いて成膜プロセスがPLDとRCEと異なるREBCO線材の I_c 分布について解析し, 成膜プロセスの違いに起因する I_c 分布はほぼ同じであり, 違いは基板上の欠陥などに起因する I_c 分布にあることを報告した。世良(九大)らは, REBCO線材において超音波接合のみを用いた超伝導特性の劣化のない低抵抗接合について, 超音波エネルギーの条件を変えて調べた。エネルギーを増加させると非常に低い $17\text{n}\Omega\text{cm}^2$ ほどの接合抵抗を得られるが, 一方で超伝導層の劣化を防ぐためにはエネルギーを109W以下に抑える必要があることを報告した。筑

本（阪大）らは、REBCO 線材の銅安定化層を直接固相拡散した接合において、加圧と 200°Cでの加熱時間の影響について調べた。高い加圧でも、接合部での空隙に酸化物形成の可能性があるため、加熱時間が短いほど低い抵抗値が得られていることを報告した。末永（山梨大）らは、超伝導体を用いた ^{13}C 検出用 RF コイルの設計について電磁界シミュレータにより解析し、測定試料の影響を抑えるように同一基板上に 2 つの共振器の位置を離すことで、測定試料に均一な RF 磁場が発生する共振モードが現れることを報告した。

11.4 同志社大 堺

「アナログ応用および関連技術」では、3月25日午前に11件の口頭発表が行われた。1件目の発表は講演奨励賞受賞記念講演であり、加藤（静大）らは超伝導力学インダクタンス進行波型パラメトリック増幅器（KITWPA）の4Kでの動作を目指し、動作温度が上昇した場合の超伝導薄膜の表面抵抗を考慮して4~10 GHzにおけるKITWPAの利得解析を報告した。温度が0.1Kと4Kでの解析結果を比較した結果、4Kでは伝送損失よりも信号利得が支配的な領域では信号波が増幅されるが、伝送損失が支配的になると信号波は伝送損失の傾きに従って減衰することを示した。また、信号利得の周波数特性の結果より、ポンプパワーを上げることで4Kにおいても、0.1Kと同程度の信号利得が実現できることを明らかにした。加藤（産総研・総研大）らは、Ti, Auの二層薄膜からなるTESとシリコン導波路を用いて作製した光量子回路を使用し、量子計算手法の1つであるガウシアンボソンサンプリングの実証実験を報告した。4個のTESを用いて実験を行った結果、4個のTESによる同時係数測定に成功し、強度相関関数がほぼ1となり高速動作で光源の状態を正しく測定できていることが明らかになった。柳生（京大）らは、ジョセフソンプラズマエミッタによるテラヘルツ波領域の周波数変換を報告した。Bi2212のSISS構造をジョセフソン接合として利用し、ジョセフソン接合に加える電圧バイアスを変調することにより発現する非線形効果を用い、高周波変調バイアス時のスペクトルを変調周波数と振幅をパラメータとして実験を行った。その結果、得られたスペクトルと計算結果はよく一致し、また温度によって違う発振が起きることも示された。永松（横浜国立大）らは、量子コンピュータにおける量子ビットの出力である微小電流を論理情報に変換する回路として、断熱量子磁束パラメトロン（AQFP）を用いた位相判別回路を設計し、利得改善を目指してシミュレーションを行った。AQFPバッファ1段目、LC共振器、AQFPバッファ2段目で構成される回路で各入力電流に対する出力確率を計算した結果、大幅な入力感度の向上が見られ、共振器を挿入して電流を増幅することで入力電流に対する応答性を高められることを示した。加古（岡山大）らは、HTS-SQUIDを用いた磁気免疫計測で、フェムト秒レーザーを用いて磁気ナノ粒子を分散させることにより磁気信号が回復する現象について、磁気ナノ粒子の凝集時間と磁気信号の回復との相関性を調査した。磁気ナノ粒子の放置時間により凝集時間を変化させ、

異なる凝集時間でレーザー照射を行い、SQUID で計測した磁気信号の変化を測定した。その結果、レーザー照射による信号強度の変化は、磁気ナノ粒子の凝集状態に依存しないことが示された。

11.5 産業技術総合研究所 竹内

「接合、回路作製プロセスおよびデジタル応用」では、3/24（日）の午後に 11 件の口頭発表が行われた（現地発表 8 件、オンライン発表 3 件）。名古屋大学を中心に、 π 接合を用いた新奇超伝導回路に関する成果が報告された。西崎（名大）からは、 π 接合を導入した rf-SQUID に基づく磁束伝送回路（ π -FTC）が報告された。Li_c 積の小さい rf-SQUID に π 接合を導入すると、負性インダクタンス領域で動作し、入力された磁束よりも大きな磁束が発生する。この特性を活かし、従来よりも大きな伝送係数が得られることが示された。さらに堀（名大）からは、 π -FTC を多段化した場合の伝送係数について詳細な解析結果が報告された。段数を増やすことで、1 を超える伝送係数が実現可能であること、すなわち入力よりも大きな出力電流が得られることが示された。本技術は、素子同士の長距離磁気結合を必要とする量子アニーラや AQFP 回路等への応用が期待される。これ以外にも、Li（名大）からは 3 接合 SQUID を用いた超伝導ダイオードについて、佐藤（名大）からはインパルス駆動型メモリセルについて、出口（名大）からは π 接合を用いた NDRO について報告があった。横浜国立大学を中心に、SFQ 回路を用いた確率的エレクトロニクスに関する成果が報告された。沢井（横国）からは、SFQ 回路に基づく Probability bit (p-bit) が報告された。p-bit は、熱ゆらぎにより確率的に 0/1 間を遷移する論理素子であり、組合せ最適化問題ソルバ等に应用できる。本発表では、SFQ 乱数生成器とローパスフィルタを組み合わせることで、乱数生成器内のジョセフソン接合のスイッチ確率を制御し、p-bit を実現できることが示された。これ以外にも、山梨（横国）からは複数の超伝導乱数生成器の並列化について、森（横国）からはクライオ CMOS 回路と SFQ 回路を組み合わせた乱数生成器について報告があった。超伝導量子計算機に関する報告も 2 件あり、政岡（理研）からは超伝導量子回路で用いる TSV の内壁の金属化について、弘中（横国）からはパルス密度変調に基づくマイクロ波生成器について報告があった。上記以外の研究では、瀬川（横国）から多数決 SFQ ゲートを用いた乗算器の設計について報告があった。

本報告は、柏木隆成(筑波大学), 長尾雅則(山梨大学), 尾崎壽紀(関西学院大学), 末吉哲郎(九州産業大学), 堺健司(同志社大学), 竹内尚輝(産業技術総合研究所), 各氏の協力により作成したものです。