

## 第 70 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、10 件のポスター発表があり、77 件の口頭発表があった。

#### 11.1 デバイス系 筑波大 柏木

2023 年 3 月 17 日午後の「基礎物性（デバイス系）」では、4 件の口頭発表があった。

4 件の口頭発表は現地で行われ、全て Bi-2212 の固有接合を用いたテラヘルツ(THz)波発振に関するものであった。小林（京大）らは、有効媒質近似を用いた超伝導テラヘルツ光源の解析と設計について報告を行った。Bi-2212 の電磁場に対する受動的な応答を異方的な誘電率テンソルによって記述し、これを 3D-FDTD シミュレーションソフトを用いて計算した。そして、電磁界モード、放射パターン、偏光特性を評価するとともに、デバイス構造が発振特性に及ぼす影響を議論した。齋藤（筑波大）らは、Bi2212-THz 波発振素子の周波数特性に素子周辺の誘電体構造が及ぼす影響を調べた。具体的には、幅 70-80  $\mu\text{m}$ 、長さ 300  $\mu\text{m}$ 、厚さ 2  $\mu\text{m}$  程度の Bi2212 メサ構造の上に、幅 500  $\mu\text{m}$ 、長さ 420  $\mu\text{m}$ 、高さ 450  $\mu\text{m}$  の凸状構造を持ったアルミナ構造体を載せて、素子の発振特性を評価した。得られた発振周波数は、メサ構造の幅から期待されるものより 3-10%程度高く、アルミナ構造体が周波数特性に影響を及ぼしている可能性があることを示した。また、シミュレーションからもこの構造体が周波数特性に影響を及ぼすことを示した。柏木（筑波大）らは、Bi2212-THz 波発振器用の結晶チップの熱処理および結晶性と発振特性の関係について報告を行った。前回の報告内容を評価個体数を増やし再度検証を行った。結晶性の特性及び発振特性の傾向を評価した結果、熱処理により臨界電流密度が変化することが、発振の有無に影響を及ぼす可能性が大きいことを示した。南（筑波大）らは、Bi2212 メサアレイの大型化とパルス駆動に関して報告した。パルス動作により、発熱を抑制することで印加電圧を増加させることが可能であることを示した。またパルス動作下で測定可能な分光器とその測定結果が報告された。アレイ型のメサ構造からの発振として環境温度によって、複数のピークを持ったスペクトルが得られる場合と 1 本のスペクトルが得られる場合があることなども報告された。さらに発熱を抑えることで 87K 程度でも発振が可能なのも示した。

#### 11.1 材料系 山梨大 長尾

「基礎物性（材料系）」では、26 件の口頭発表があった。

銅酸化物超伝導体関連 7 件、鉄系超伝導体関連 6 件、新規超伝導体関連の合成 3 件、計算 2 件、機械学習を用いた物性の予測 2 件、高圧合成装置関連 2 件、デバイス系の接合関連 2 件、量子化磁束関連 2 件と多岐にわたる講演があった。

Bi-2223 と RE-123 銅酸化物超伝導体の接合において、La-214 をバッファ層として用いる提

案があった。Pr-247において、NMR等の測定によってダブルチェーンが超伝導となっている新たな証拠が報告された。複雑な構造を持つ鉄系超伝導体  $\text{Ca}_5(\text{Sc,Ti})_4\text{Fe}_2\text{As}_2\text{O}_{11}$  の単結晶がセルフフラックス法によって育成されたという報告があった。ダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた高圧下での試料合成と電気抵抗測定が同時行える装置を用いて、In-S系の新規超伝導相の発見について報告があった。機械学習による超伝導転移温度( $T_c$ )の予測において、用いるデータセットにおけるデータの偏りの影響について報告があった。第一原理計算による水素化物やグラファイト層間化合物の新規超伝導体に関する提案があった。FeSe薄膜の磁化測定から得られた $T_c$ が電気抵抗率から見積もった $T_c$ と異なる結果になることが報告された。Nd-1111鉄系超伝導体の異方性が精密に測定され、3-4程度であることが報告された。分子線エピタキシー(MBE)法により、二元系窒化物超伝導体薄膜の育成に関する報告があった。Ir添加した(La,Sr)MnO<sub>3</sub>薄膜が超伝導体になる可能性について報告があり、今後の展開が期待される。クーパー対分離現象を観測するための超伝導ナノ細線の作製と評価に関する報告があった。磁気光学イメージングによる磁束量子のクラスター形成の直接観測に関する報告があった。今回、新規超伝導体に関する提案や実際のデータがいくつか報告された。新たな超伝導体が増えることは、超伝導研究に広がりを持たせるため、極めて重要であり、今後の報告が期待される。様々な超伝導体の合成および物性評価等に関する活発な議論が展開された。ハイブリットで開催され、対面で行われた会場は一時立ち見が出るほどの盛況ぶりであった。

## 11.2 関西学院大 尾崎

11.2「薄膜，厚膜，テープ作製プロセスおよび結晶成長」では3月16日午前3件のオンラインでのポスター発表と3月16日午後11件のハイブリットでの口頭発表があった。合計14件の発表の内、4件はオンライン講演であった。内訳は、Bi系線材で1件、RE系超伝導膜で5件、鉄系超伝導膜で2件、MgB<sub>2</sub>超伝導膜で1件、無限層ニッケル酸化物薄膜で1件、MgTi<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/SrTiO<sub>3</sub>多層膜で1件、微細構造観察に関する検討が1件、PLD法に関する検討が2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。

Jah(九工大)らは、PLD法を用いてスピネル型MgTi<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(MTO)とSrTiO<sub>3</sub>(STO)の積層膜をMgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(MAO)基板上に成膜し、積層周期に対する抵抗率の温度依存性を評価した。その結果、MTO/STO = 20 nm / 40 nm以下の周期において50 K近傍で抵抗率が急激に低下する傾向が確認された。櫻井(名大)らは、NdFeAsO薄膜の表面に保護層として各種金属を蒸着し、それらの金属層がHドーピングに与える影響について検討した。その結果、単純に金属のH透過率の影響だけでは説明できない挙動が得られており、Hドーピング処理時における雰囲気中酸素も影響している可能性を示した。一瀬(電中研)らは、ピン入りREBCO薄膜線材の多数のTEM像から、主成分分析(PCA)を用いてデータ駆動型研究に適用可能な特徴量を抽出する試みについて報告した。PCAは元データの多次元の情報から特徴量を抽出し次元を削減することで、2次元平面上に視覚的に表現することが可能な分析手法である。双晶の影響が

少ないデータを用いることで明瞭なナノロッドがあるかどうかの分類には成功しているものの、ナノパーティクルや双晶界面が存在する場合には明確な特徴量を抽出できておらず、今後より有効な分類手法の探索が必要であると報告した。大崎(青学大)らは、これまで YBCO 薄膜表面にスパッタリングで Ag 層を形成し、その後、酸素気流中で熱処理を行うことで積層欠陥が形成される知見を得ている。本研究では、Ag 層の厚さ、アニール温度や YBCO 薄膜の Cu 組成比と積層欠陥導入量の関係を系統的に調べた。その結果、Ag 層を厚くする、アニール温度を高くする、Cu 組成比を過剰にすることで積層欠陥が多く導入されると報告した。

### 11.3 九州産業大 末吉

11.3 「臨界電流・超伝導パワー応用」では3月17日の午後に10件の口頭発表があった。

伊藤(名大)らは、VLS 成長法によって  $3.7\ \mu\text{m}$  と厚膜化した YBCO 薄膜において、高磁場で  $J_c$  特性が高い示す傾向にあることを示し、厚膜化が磁束クリープの抑制に有効である可能性について報告した。木内(九工大)らは、VLS 成長法によって作製した膜厚の異なる YBCO 薄膜の  $J_c$  特性について磁束クリープ理論を用いて解析し、膜厚が厚いほど磁束バンドルサイズが膜厚の制限を受けないことにより磁場中の  $J_c$  特性が改善されることを定性的に示した。末吉(九産大)らは、人工ピン入り高温超伝導線材では、重イオン照射による  $J_c$  の増加はピン無し線材より顕著であることを示し、 $T_c$  の低下がピン無し線材より小さいことに要因があることを報告した。石渡(農工大)らは、鉄系超伝導体 Ba122 に K ドープした多結晶バルクにおいて最も高い  $J_c$  特性を示した  $700^\circ\text{C}$  の熱処理した試料において、磁気光学法を用いて対称的な磁束密度分布を観測し、超伝導電流が均一に流れていることが要因であることを報告した。松野(有明高専)らは、TDGL 方程式にて量子化磁束の運動を効率的に数値解析する手段の一つである幾何学的数値積分法の性能評価を TDGP 方程式に適用して行い、時間刻み幅を大きくすると解析解との誤差は大きくなるが、安定性に優れていることを示した。土屋(東北大)らは、高温超伝導薄膜を用いた超伝導ダイオードの整流作用を決定する表面バリアのポテンシャルの形状について、 $T_c$  近傍での微小交流信号に対する高調波測定から基板界面と薄膜表面での特徴を明らかにした。呉(九大)らは、超伝導線材に対して磁気顕微鏡を用いた磁化緩和特性の測定において誘導電界を制御した  $n$  値の局所的/連続的な評価を長尺線材に適用し、 $I_c$  値と  $n$  値の局所分布を評価した結果について報告した。木須(九大)らは、高温超伝導線材にループ状の曲げを加えたときのループ径と線材の端子間距離の関係が Clothoid 曲線で記述できることを実験的に確認し、またこれまで測定できなかった  $5\ \text{mm}$  以下の小径の曲げ試験に適用した結果について報告した。大倉(中部大)らは、超伝導ケーブルコア内の 2 本のケーブルに電流を同方向および逆方向に通電したときの磁場分布をホール素子により径方向で測定し、ケーブル 1 本に流したときの磁場分布の単純和との比較を行うことで、各ケーブルの自己磁場の影響について報告した。中村(京都大)らは、高温超伝導誘導動機モータの開発において、回転子巻き線

においては超伝導化は有効であるが、固定子巻き線材料においては、非線形な電流－電圧特性により三相不平衡となる超伝導材料よりも、オームの法則に従う常伝導体の極細化が重要であることを示した。

#### 11.4 岡山大 堺

11.4「アナログ応用および関連技術」は、3月17日の午前に、10件の口頭発表が行われた。3月17日の午前前半は検出器に関する発表があり、野口（産総研）らは、STJ検出器をX線検出器に応用する際に課題となっているフォノンノイズについて、ノイズの要因となっているSi基板の構造を改良することでノイズ低減が実現できることを明らかにした。加藤（総研大、産総研）らは、超伝導転移端センサー（TES）を量子情報通信や量子計算分野で使用する際の課題である時間ジッタ向上を検討するため、Ti/Au二層薄膜からなるTESを7mKまで冷却し、1550nmのパルスレーザーを照射して、FLL動作下のSQUID出力信号を解析した。その結果、光子数、しきい値がタイミングジッタに与える影響やジッタが制限される要因を明らかにした。安川ら（東理大）らは、超伝導細線クライオトロン of 基礎的な理解を目的に、チャンネルのくびれ幅  $W_c$  を変化させた場合のゲート電流に対するチャンネルの直流電流-電圧 ( $I_{ch}$ - $V_{ch}$ ) 特性などの変化をシミュレーションにより解析した。その結果、常伝導転移がチャンネルのくびれ部分で起こり、 $W_c$  の大小に関わらず、 $I_{ch}$ - $V_{ch}$  特性に大きな差がないことを明らかにした。午前後半のセッションでは、無線電力伝送やSQUID顕微鏡など様々なアナログ応用に関する発表があり、武田（山梨大）らは、無線電力伝送で伝送効率の改善が期待できる超伝導アンテナの耐電力特性向上について、高  $J_c$ -超伝導薄膜を使用した超伝導コイルの耐電力特性のシミュレーション結果を報告した。その結果、銅パッチアンテナと比較して利得が3.6dB高く、市販REBCO薄膜を用いたものより77Kで11倍、35Kでは33倍の耐電力特性が実現できる可能性を示した。増井（国立天文台）らは、超伝導量子計算機において大規模集積回路を実現するために求められている小型アイソレータを著者らが新しく提案し実証実験を行った。実験結果では0.01-1.50GHzにおいて17dB程度のアイソレーションが確認でき、この結果は理論計算とも一致し、超伝導マイクロ波増幅器と組み合わせてアイソレータとして動作することも報告した。

#### 11.5 産業技術総合研究所 竹内

11.5「接合、回路作製プロセスおよびデジタル応用」では、3/16（木）の午後に16件の口頭発表が行われた（現地発表14件、オンライン発表2件）。奨励賞受賞記念講演として、片山（広大）からは超伝導素子を用いた擬似的ホーキング輻射の実証実験に向けた理論研究の進展が報告された。連続体近似が有効であることを数値計算により示し、実証実験の実現可能性を示唆した。名古屋大学を中心に、 $\pi$ 接合を用いたSFQ回路の研究結果が報告された。藤巻（名大）からは、SFQパルスによる $\pi$ 接合メモリセルの読出し／書込み動作実証が報告された。半選択を含む全ての書込みパターンがSFQパルスにより実証された。

佐藤（名大）からは、 $\pi$  接合メモリアレイの拡張性に関する検討結果が報告された。32 bit まではメモリアレイを拡張できることが示され、さらなる大規模化に向けた議論が行われた。これらは、高速な超伝導メモリアレイの実現に向けた重要な成果である。東北大学、横浜国立大学を中心に、超伝導素子のニューラルネットワーク応用に関する研究が報告された。注目講演として、渡邊（東北大）からはジョセフソン接合の二次元アレイによるリザバー計算が報告された。数値計算により、画像分類が可能であることが示された。伊東（横国大）からは、QFP ベースのボルツマンマシンのパラメータ最適化が報告された。最適化により、理想的な確率分布が得られることが示された。上記以外の研究では、GM 冷凍機内のジュール熱低減方法、ArF 液浸露光装置を用いた量子回路の作製検討、ジョセフソンインダクタンスを用いた AQFP 回路の小型化、超伝導乱数生成器の並列化、低  $J_c$  プロセスを用いた量子ビット制御回路などの多様な研究成果が報告された。

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(岡山大学), 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。