

第 84 回応用物理学会秋季学術講演会報告

大分類 11 超伝導

11 超伝導大分類では、21 件のポスター発表があり、86 件の口頭発表があった。

11.1 デバイス系 筑波大 柏木

2023 年 9 月 21 日午後の「基礎物性（デバイス系）」では、12 件の口頭発表があった。内訳としては、ジョセフソン接合特性に関する研究が 1 件、Bi2212 の固有ジョセフソン接合デバイスに関する研究が 11 件であった。

ジョセフソン接合特性に関する研究では、原岡（九工大）らが接合面内に臨界電流の不均性がある十字型ジョセフソン接合モデルの磁気干渉について十字型であることの特徴が報告された。

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、京都大学と筑波大学のグループから報告があった。

京都大学のグループからは、小林らが Bi2212 テラヘルツ波発振器の発振効率向上に向け、有効媒質近似モデルの構築とそれを用いた素子特性評価を行い、材料特性が周波数特性に及ぼす影響などを議論した。宮本らは、発振素子への印加電圧の変調が発振スペクトルに及ぼす影響について発表した。大変興味深いことに、印加電圧の変調周波数及び強度を調整することで、周波数がコム状に変化することが報告された。また通信応用の可能性についても議論された。

筑波大学のグループからは、高出力化に向けたデバイス構造及び素子制御を中心とした研究として、菊池らが発振素子の形状と出力特性に関する研究、榎本らがパッチアンテナを用いた素子構造の開発とその特性、葛見らが 3 アレイ素子を用いた発振素子構造の開発、南らがパルス電圧制御による周波数掃引、山田らが Bi2212 単結晶の細線加工技術、といった研究が報告された。また結晶材料特性とデバイス特性に関しては、柏木らが Bi2212 単結晶の結晶組成及び過剰酸素がデバイス特性に及ぼす影響、中川らが発振素子の酸素濃度制御技術とその結晶性の関係、前島らが結晶酸素濃度が発振特性に及ぼす影響、といった研究が報告された。さらに、Bi2212 テラヘルツ波発振器の応用としてテラヘルツイメージングに関する研究が山内らにより報告された。高出力化については、さらなる検証が必要である状況であったが、注目講演の南らの研究では、印加パルス電圧の波形を調整することで、素子の温まり方が制御でき、その上で発振する周波数の掃引とその強度が調整可能であることが示されており、このデバイスの新たな応用の可能性が示された。

上記のように、今回の学会では、Bi2212 単結晶を用いたテラヘルツ波発振素子においては、発振周波数制御の技術において大きな進展があり、それを用いたアプリケーション

ン開発が今後進むことが期待される。

11.1 材料系 山梨大 長尾

「基礎物性（材料系）」では、23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7件、ニッケル系酸化物超伝導体関連2件、その他の超伝導体(合成, 作製)5件、物性関連2件の講演があった。これに加え、基礎物性として4件のポスター発表があった。

今回、注目講演であったニッケル系酸化物超伝導体に関する講演では、高圧下において $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 相の 80 K 付近での超伝導転移の再現が報告されるとともに、立ち見が出るほどの盛況ぶりであった。Pr 系酸化物を合成する際に用いられる Pr_7O_{11} が加熱によって酸素量が複雑に変化するという報告があった。CuO ダブルチェーンが超伝導の駆動源となっている Pr-247 へのポストアニールや Zn 添加によって、その新たな証拠を探索する試みが報告された。リング状の Y-123 バルク体を重ねて用いることで、卓上 NMR に用いることが可能なレベルの安定した着磁について報告された。Bi-2223 と Y-123 の間に La-214 を入れることで、非超伝導層の生成を抑制し、超伝導電流が流れる接合を作製できるという報告があった。Fe(Se,Te) 薄膜を基板から機械的に剥離し、その超伝導特性について報告があった。[010]-tilt した基板上に作製した Fe(Se,Te) において、9° 付近の傾きを持った試料において、特異的な振舞いが報告された。(SnSe)層と(NbSe₂)層から構成される層状ミスフィット超伝導体において、(SnSe)層を12層有する単結晶育成の報告があった。CeOBiS₂ 超伝導体に Sb と Se を置換した単結晶を育成し、その超伝導相図に関する報告があった。Pr をわずかに添加した ReN_x 薄膜において、BKT 転移の観測が報告された。CaCuO₂ 無限相構造に BaBiO₃, LaCrO₃, EuFeO₃ を用いた超格子構造を作製し、その結晶性や超伝導性に関する報告があった。Y-123 と強磁性体の薄膜を用いて、強磁性体が超伝導電子に与える影響について調べた報告があった。また、ポスター発表においても、磁性体と超伝導に関する報告があったことから、超伝導大分類のキーワードとして、“磁性”や”スピン”といった言葉を加えることを検討したいと考えている。

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 9 月 20 日午前には 7 件のオンサイトでのポスター発表と 9 月 20 日午後には 13 件のハイブリットでの口頭発表があった。合計 13 件の口頭発表の内、1 件はオンライン講演であった。内訳は、RE 系超伝導膜で 12 件、鉄系超伝導膜で 1 件、MgB₂ 超伝導膜で 1 件、導電性中間層で 2 件、その他で 4 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。李(成蹊大)らは、TFA-MOD 法で作製した(Y,Gd)BCO 及び(Y,Gd)BCO+BHO 線材における J_c の膜厚依存性を調べた。その結果、(Y,Gd)BCO+BHO 線材の自己磁場 J_c は、ナノ粒子導入によって、測定したすべての膜厚で(Y,Gd)BCO 線材より高い J_c を示した。ナノ粒子

導入と膜厚増加によってクリープレートが低下する。また、臨界膜厚(L_c)を境界に J_c の膜厚依存性が異なると報告した。有田(名大工)らは、REBCO 薄膜の液相成長時の結晶成長について Monte Carlo 法を用いてシミュレーションし、REBCO 分子が溶媒和の状態になるとの仮定の下でモデル化して基板温度が異なる際の成長時の組織(ステップの形状やサイズなど)の違いを考察し、組織の変化を議論する上で有用な解析であるとの報告があった。青木(阪大)らは、磁気ジョセフソン素子の基材に向けた PMN-PT の電界変調効果を、A15 型超伝導物質である V_3Si で確かめた。また、PMN-PT と V_3Si 間のバッファ層として Pd, V, Cr を選択し、バッファ層との相性も検討した。その結果、 T_c^{onset} は $V < Cr < Pd$ と高くなったが、 ΔT_c は Cr が最も小さく、これはバッファ層と V_3Si 間での金属拡散に依存していると説明した。最後に $V_3Si/Cr/PMN-PT$ 構造において電界を印加し、 V_3Si の電界変調による T_c の変化が確認された。質疑では、 T_c^{onset} が何で決まっているか、A15 型である V_3Si の物性をきちんと確認すると良い、などのやり取りがあった。水口(都立大)らは、超伝導転移に際して生じる熱伝導率の変化に直目し、磁気熱スイッチング特性を評価した。材料は純度の異なる Nb, Pb など、純度によってスイッチング比が異なることを説明した。また、合金であるハンダにおいては、組成の分布から磁場の印加方向の変化に対してヒステリシスを生じることも明らかにした。質疑では、ハンダの組成による微細組織の違いと、それによるヒステリシスの大きさの変化について議論された。

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9月21日午前6件の口頭発表があった。末吉(九産大)らは、人工ピン入り高温超伝導線材に対する重イオン照射においては、ピン無しの高伝導薄膜と比較して超伝導転移温度 T_c の減少が小さいために、エネルギーの高いイオンビームでより高い臨界電流密度 J_c が得られることを報告した。呉(九大)らは、機械学習を導入したリール式磁気顕微鏡観察を用いて REBCO 線材における局所 J_c 低下領域の大きさとそのサイズ分布の検出を試みた。0-8mm の孤立した J_c 低下領域と 4-36mm の J_c 低下領域の集団の2種類の頻度分布を明らかにし、後者が局所 I_c を低下させる要因であることを報告した。木須(九大)らは、リール式局所磁化計測を用いて測定した 77K と 4.2K における REBCO 線材の長局所臨界電流 I_c を比較し、リフトファクタについて議論した。同じ線材内であれば局所 I_c が分布していてもリフトファクタは一定値で有効であるが、作製プロセスが異なると 77K と 4.2K の I_c の比が異なり、リフトファクタのバラツキの要因になることを示した。武田(物材研)らは、超伝導接合をもつ高温超伝導閉ループにおいて接合抵抗に Ag への分流と Anderson-Kim モデルの磁束クリープを考慮することで、4.2K, 1T での閉ループ電流と接合抵抗の時間依存性を定量的に再現できることを示した。筑本(中部大)らは、REBCO 線材の銅安定化層を直接固相拡散した接合の低抵抗化における再現性を向上させるために、接合圧力、

接合温度、加圧・加熱の時間や雰囲気ガスなど接合プロセス条件の最適化を試みた。接合部の断面観察では、空隙があり未接合の領域があるが、クエン酸処理の効果により酸化物などの不純物は含まれず、また 200°C の低い熱処理温度でも銅が結合していることを示した。筑本（中部大）らは、超伝導ケーブルコアに流れる超伝導電流の自己磁界の影響を把握するためのホール素子を用いたケーブル周囲の磁場分布の測定系において、他の配線からの磁場の影響など受けないようにレイアウトを見直すことで、各線材に通電および複数の線材に同時通電時の磁場分布をより正確に測定できることを報告した。

11.4 同志社大 堺

11.4「アナログ応用および関連技術」では、9月21日午後に23件の口頭発表が行われた。松丸（産総研）らは、強磁場環境下において動作可能な電圧標準を用いたシステムを実現するため、希釈冷凍機中に実装したジョセフソン素子の周囲に設置する独自設計の磁気シールドについて報告を行った。Nb製の磁気シールドを用いて10 Tの超伝導マグネットとキャンセレイションコイルを組合わせて生じた約3.6 mTの磁場を印加した結果、残留磁場を1 mT未満に抑制することができたが、目標の地磁気レベルよりかなり大きく、冷却した際に生じた隙間がシールド性能低下の一因であることも示した。工藤（埼玉大院）らは、超伝導デバイスの高密度な集積を実現するため、SQUIDを3次元的に実装することを想定し、複数の層構造を持つ基板同士のpad作製と評価を行った。高速原子ビーム（FAB）の照射時間を変化させた場合のI-V特性を示すとともに、接合界面に中間層が発生する原因の調査を行い、Nb-padのないSi基板にFABが照射されていることが一因であることを報告した。上土井（東大工）らは、超伝導転移端センサ（TES）を用いて、光量子コンピュータの実現に必要な高速応答かつ高い光子数識別能力を有する単一光子検出器の実現を試みた。有感領域を最適なデザインにするため、FIBでイリジウム薄膜を加工し有感領域を作製した。その結果、FIB加工した試料のうちいくつかは超伝導に転移しないものが見られ、FIBでイリジウム薄膜を加工した場合、イリジウム薄膜が炭素膜で覆われていることがわかり、炭素膜の除去により改善できる可能性があることを示した。早川（産総研）らは、光TESの検出面積が狭いという課題に対し、多画素アレイ化した素子を用いてマイクロ波SQUID多重化周波数分割方式(MW-Mux)により高速多重読み取りを検討した。40画素の多重化読出しチップを作製して特性を評価した結果、共振周波数の設計値と実測値との誤差は40 MHzよりも小さく、また、サンプリング周波数5 MHzでのマイクロ波SQUID読出しチップを用いて10画素の読出しができることを明らかにした。藪野（情通機構）らは、ストリップ幅を数十 μm まで拡大した超伝導ワイドストリップ光子検出器（SWSPD）の課題であった固有暗計数がバイアス電流に比例して増加することを抑制するため、バイアス電流の分布を検討し、分布の影響を防ぐHCCB構造を提案した。その結果、HCCB構造を用いることで固有暗計数の抑制に成功し、高検出効率を実現したことを報告した。

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、9/21（木）の午後に13件の口頭発表が行われた（現地発表12件、オンライン発表1件）。名古屋大学を中心に、 π 接合を用いたSFQ回路に関する研究成果が報告された。Li（名大）からは、 π 接合を用いた整流器について報告された。 π 接合を応用した位相シフタをSQUIDに導入することで超伝導ダイオードを実現できること、さらに4つの超伝導ダイオードをブリッジ状に組み合わせることでAC/DC変換が可能であることが示された。これにより、大規模SFQ回路のバイアス電流供給に関する問題が解決できることが期待される。東（名大）からは、 π 接合を用いた磁気結合の強化について報告された。 π 接合をrf-SQUIDに導入することで、磁気結合が実効的に向上することが数値計算および実験により示された。横浜国立大学を中心に、QFPに関する研究成果が報告された。伊東（横国）からは、QFPを用いた制限ボルツマンマシンについて報告された。制限なしのボルツマンマシンに比べてニューロン同士の結合が簡素になり、レイアウトに関するスケーラビリティが改善することが示された。山栄（横国）からは、ベネットクロッキングを導入したAQFP回路について報告された。同クロッキングを用いることで、論理的に不可逆的なAQFP回路でも可逆計算を実現可能であることが示された。NICTを中心に、量子計算に関連したデバイス作製に関する研究成果が報告された。寺井（NICT）からは、量子ビット応用に向けたNbNジョセフソン接合について報告された。トンネル障壁をAINからMgOに変更することで、リークのない低 J_c 接合が実現可能であることが示された。これは、小面積かつコヒーレンス時間の長い量子ビットの実現に向けた重要な成果である。宮嶋（NICT）からは、通常のジョセフソン接合と π 接合の両方を集積可能なプロセスについて報告された。リフトオフにより、従来のNbNプロセスに π 接合を追加的に集積可能であることが示された。上記以外の研究では、ジョセフソンインダクタンスを用いたSFQ回路の設計、準粒子拡散と補足に関する理論的研究、量子回路のSPICEベースのシミュレーション、SFQパルス変調方式を用いたマイクロ波発生器、NbN超伝導ペースト等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(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。