

「高度情報処理・通信の実現に向けたナノ構造体材料の制御と利用」
平成 14 年度採択研究代表者

石田 武和

(大阪府立大学大学院工学研究科 教授)

「超伝導ナノファブリケーションによる新奇物性と応用」

1. 研究実施の概要

本プロジェクトは、超伝導実験チームと超伝導理論チームが協力しながら、ナノファブリケーション微細加工技法を生かして新奇物性発現や MgB_2 中性子検出器としての応用展開を目指すことを特徴としている。

初年度は CREST チーム体制を整え、博士研究員の採用、初期設備の導入、キックオフミーティングの開催、原子炉での中性子検出予備実験、 MgB_2 薄膜の作成と微細加工の予備実験、理論チームのターゲット設定とアクセス可能な計算機資源の確保に実があった。

第2年度は、プロジェクトの基盤設備の整備、第1回国際ナノファブワークショップ（京都）の開催、超伝導微細構造や MgB_2 検出器のプロセス開発、地球シミュレーターの利用採択、総括助言による研究組織の見直しを行った。d-ドットや中性子検出器の大規模計算を実現、原研研究炉で中性子検出予備実験による問題点の整理、20ps パルスレーザー照射装置による中性子照射の予備実験体制を確立した。ISS2003 で招待講演をしている。

第3年度は、中間的な研究機器の充実、第2回国際ナノファブワークショップ（大阪）の開催、 MgB_2 -AlN-NbN ジョセフソン接合の高品質化、世界で始めて全 MgB_2 -AlN- MgB_2 接合に成功など大きな成果があった。 MgB_2 検出器に関しては、パルスレーザー実験により、素子の製作や検出回路への対策を立てた。 MgB_2 検出器開発に向けたダイナミクスの大規模解析、d-ドット半整数磁束のマニピレーションの理論などの進展があった。実験面ではd-ドット磁束像の実験と理論の比較を残留磁場の影響の観点で整理した。

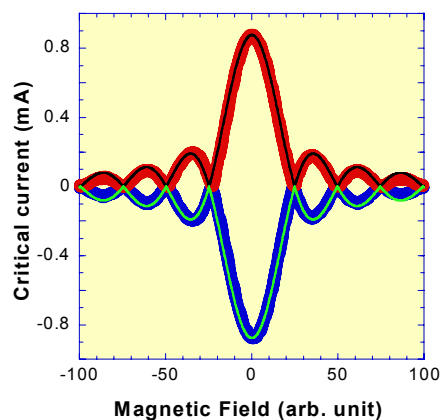


図1. 世界初の MgB_2 -AlN-NbN ジョセフソン接合の理想的 Fraunhofer パターンと理論曲線

第4年度は、博士研究員を1名から2名に増員したが、1名は年度途中でパーマネント研究職に就かせた。JST本部の領域横断企画ナノバーチャルラボ超伝導関連ジョイントワークショップ NVLS2005（夢舞台国際会議場）を開催した。実験では、 MgB_2 素子のメンブレン化に成功した。理論では、SQUID顕微鏡の画像解析分解能向上のため新手法を開発した。d-ドットの量子ダイナミクス理論が進展し、Quビットとしての応用可能性を拓いた。ナノ超伝導国際会議（クレタ島）の3件をはじめ国際会議からの招待講演の数も増えてきた。

今後は、イオンエッチング装置の導入などで超伝導ナノファブリケーションの手法を高度化し、高品質のナノ構造超伝導体の作製、物性評価、及び MgB_2 素子の作製に務め、原研研究炉での中性子検出実験の検証、超伝導ナノ構造体の理論の更なる整備を行う。

2. 研究実施内容

MgB_2 薄膜のエレクトロニクス応用に関して、より高い臨界温度を持つ薄膜の作成と結晶性の改善を行った。 AlN バッファ層を用いる事により、 MgB_2 薄膜の臨界温度が若干ではあるが上昇した。また、面内の配向性の改善が確認された。このことは、 AlN バッファが MgB_2 薄膜の成長に関して有効に作用している事を示唆している。図1に示すように接合に関しては、 $\text{MgB}_2/\text{AlN}/\text{NbN}$ の三層構造接合、 $\text{MgB}_2/\text{AlN}/\text{MgB}_2$ の三層構造接合で、世界で初めて典型的な SIS 接合の特性を得た。

中性子検出器への応用を目指した MgB_2 素子のメンブレン構造化のプロセスを確立することができた。今後は、 MgB_2 薄膜のさらなる高品質化や、メアンダ幅の更なる細線化を目指す。 ^{10}B エンリッチしたターゲット(97%)を用いた。 MgB_2 薄膜メアンダパターンは幅 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、総距離 38 cm で電子線リソグラフィ技術により加工を行った。図2に作製した素子の光学顕微鏡写真を示す。サファイア基板上に作製した素子の超伝導特性は、 $T_c = 28.3\text{ K}$ 、 $\Delta T = 0.14\text{ K}$ と薄膜の特性とほぼ同じ特性が得られ、特性劣化のない素子を作製した。パルスレーザー照射による熱応答特性の評価のための測定システムの整備が完了し、 MgB_2 素子の熱緩和信号

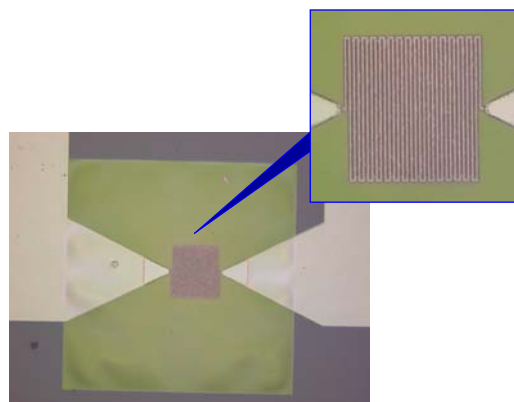


図2. MgB_2 中性子検出メンブレン素子の写真

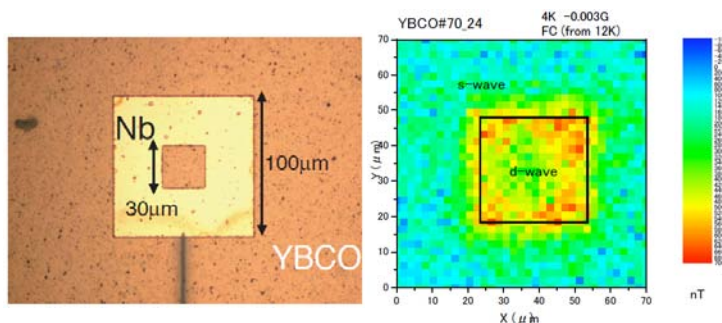


図3. 作製したdドットの写真とSQUID顕微鏡による磁束分布

の捕捉に成功している。応答時間は $1\mu\text{s}$ 以下と既存の典型的な検出器を 2 桁上回る優れた高速応答を得た。

図 3 は Nb を用いてフォトリソグラフィーで作製した d ドットの写真と 4K における d ドット周囲の局所磁場分布を示している。測定は、12K から残留磁場をうち消すための磁場 3mG の中で 4K まで冷却して行った。ここで、4K では Nb も $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ も超伝導状態であるが、12K では Nb は常伝導状態になる。Nb 部分がマイスナー状態になっていれば、d ドットの周囲の局所磁場値を積分すると、d ドットの回りの磁場値は $1.91\Phi_0$ となった。可能な解釈は d ドットの回りは同じ符号を持つ 4 つの半整数磁束で占められている。d ドットのサイズが磁束侵入長と比べて、充分小さければ反強磁性的に分布することが期待されるが、作製した d ドットは SQUID 顕微鏡の測定のために磁束侵入長と比べて充分大きく ($30\times 30\ \mu\text{m}^2$) 作製されているので、磁束配置の条件が緩いと考えられる。

超伝導ネットワークの作製と評価については、電子ビーム加工装置を活かした作製プロセスの検討を行い、Pb と Nb に関して、いくつかの試料作製に成功している。同様に、 MgB_2 の微細加工に関して、最初にプロセスの確立に成功した。超伝導ネットワークの作製では、リフトオフ法と乾式エッチングの功罪を十分に考慮して、プロセスの開発を行った。

CREST で導入した SQUID 顕微鏡を利用して、これらのネットワークの評価を行ったが、図 4 示すように分子動力学的手法で Reichhardt 達が行ったシミュレーションの結果と比較したところ、共に迷路状のボルテックスパターンを与えており、驚くほどの良い一致を示すなど、有限系の超伝導ネットワーク研究が進展した。

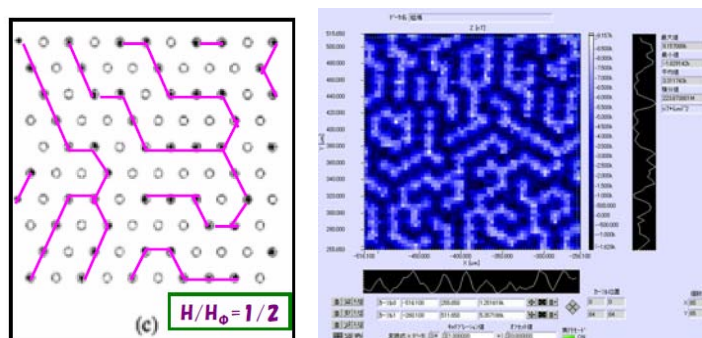


図 4. Pb 超伝導微細孔格子の磁束分布と理論の比較

原子力機構東海地区実験 (JAEA) グループは、 MgB_2 の物質構成元素のホウ素の同位体 ^{10}B が中性子と高い確率で核反応 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ を起こすことを利用した中性子センサーの開発を目指してきた。関西地区の素子開発が、メンブレン化の段階で大変な困難に直面し、約 1 年間、良い MgB_2 素子が得られなかった。図 5 は、関西地区で作製され、原子力機構東海地区で実験のために配線されている素子の写真である。素子の特徴は、低インピーダンスである

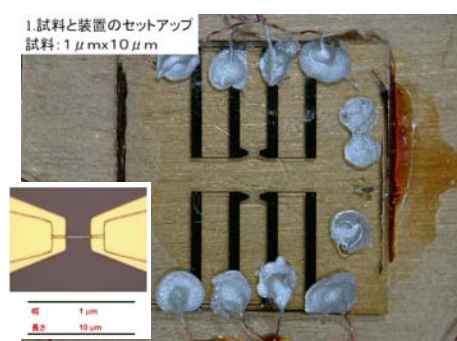


図 5 粒子線照射テスト試料

こと、線路が短いことである。現在までに、Am からのアルファ線を照射する予備的な実験を実施してきたところ、信号らしきものが見え始めている。

MgB₂ を用いた中性子検出器の基本的な中性子検出の逐次過程についての数値シミュレーション手法を確立した。また、図 6 に示した地球シミュレーターを用いた超大規模な数値シミュレーションにも成功した。今後は、X線検出器で既に検出を実現している超伝導転移近傍での電圧バイアス条件を精査する。d ドットの静的な性質を調べるための定式化を行い、計算方法を確立し、正方形の d ドットに関して、図 7 に示した半整数量子磁束の自発的発生と磁束構造を得た。さらに、正方形 d-dot 磁束が外部電流による制御可能であることを確かめた。d- ドット系の位相のダイナミクスをコンパクトな 1 次元ジョセフソン接合系へのマッピングし、サブミクロンサイズの微小 d- ドット系に対する巨視的量子理論の構築に成功し、量子論的 2 準位系と位置づけた。超伝導ネットワークでは、有限ネットワークにおいて無限のネットワークとは異なる磁束構造が発生する事を見いだした。

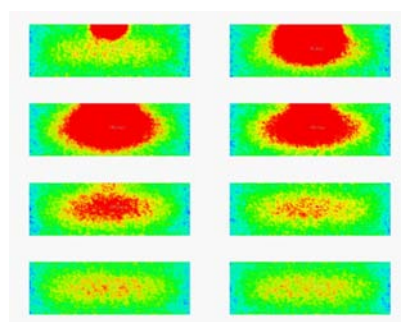


図 6 超伝導 MgB₂ 素子の熱的ダイナミクスの逐次変化のシミュレーション

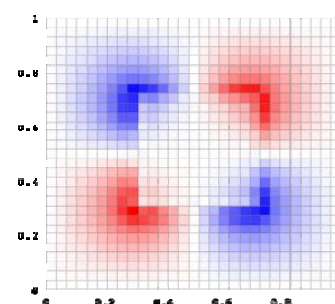


図 7 2 成分 GL 理論で計算した d ドット磁束分布

超伝導細孔格子を持つ超伝導薄膜を臨界温度上から急冷するシミュレーションを行い、量子磁束のアンバランス（磁束数－反磁束数≠0）が長時間残存できることを示し、Kibble-Zurek 機構による自発的な渦糸の生成での解釈を行った。また、de Gennes-Alexander 理論を低温の非線形領域まで拡張し、有限超伝導ネットワークにおける新奇な相転移の可能性を指摘した。超伝導ネットワークの SQUID 顕微鏡の画像は、2 次元のマトリックスデータである。各ピクセルの真の磁場値と測定値の間に形状因子を考え、逆変換により真の磁場値が得るアルゴリズムを提案した。図 8 は、このアルゴリズムによる処理前の画像と処理後の画像であり、処理後の画像では、磁束量子の識別がより明確になっている。

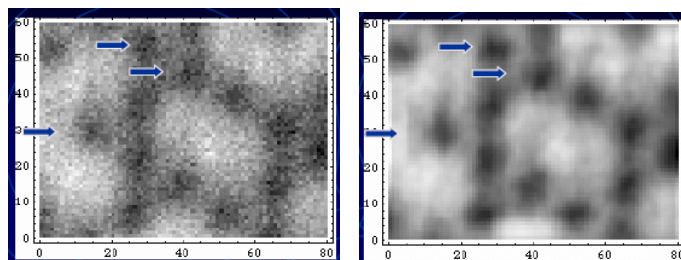


図 8 SQUID 顕微鏡の生データ(左)と画像処理像(右)

微小超伝導系では、磁場下での正方形の微小超伝導板における準粒子構造を明らかにし、特に超伝導エネルギーギャップ内に 2 種類の束縛状態が現れる事を明らかにした。また、

複数の渦糸が表れる場合に、その回りの束縛状態が干渉し合い渦糸分子と呼べる状態になる事を見いだした。厳密対角化法の並列化に成功し、地球シミュレーター上で千数百億次元の行列の対角化を行い、ナノスケールに閉じ込めた強相関係において新しいタイプの超流動相関が現れることを見出した。メビウスの帯超伝導体（トポロジーの一形態）における秩序変数と電子状態（状態密度）を GL 方程式、および Bogoliubov-de Gennes 方程式に基づき解析し、新奇な Little-Parks 効果の発現を指摘した。

3. 研究実施体制

関西地区実験グループ

「大阪府立大学」サブグループ

- ①研究分担グループ長：石田 武和（大阪府立大学大学院工学研究科、教授）
- ②研究項目：超伝導ナノファブリケーションによる超伝導微細系の設計・製作と研究の総括

「大阪府立産総研」サブグループ

- ①研究分担グループ長：四谷 任（大阪府立産業技術総合研究所情報電子部、部長）
- ②研究項目：電子ビーム露光装置を用いた超伝導体のナノ加工技術

「情報通信研究機構」サブグループ

- ①研究分担グループ長：王 鎮（情報通信研究機構関西先端研究センター、グループリーダー）
- ②研究項目：MgB₂ 薄膜、トンネル接合の作製及び中性子検出器応用

原子力機構東海地区実験グループ

- ①研究分担グループ長：岡安 悟（日本原子力研究開発機構中性子利用研究センター、副主任研究員）
- ②研究項目：MgB₂ 薄膜を用いた超伝導中性子センサーの開発

超伝導理論グループ

- ①研究分担グループ長：加藤 勝（大阪府府立大学大学院工学研究科、助教授）
- ②研究項目：超伝導ナノ構造体の理論の構築と応用分野の開拓

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

- 著者氏名：Takashi Hiraoka, Yohsuke Kamada, Takuya Matsumoto, Hideki Fujiwara, Toyonari Sugimoto, Satoru Noguchi, Takekazu Ishida, Hiroyuki Nakazumi, and Hiroko Aruga Katori

論文題名：Metallic/semiconducting behaviors and an antiferromagnetic ordering

- of FeBr_4^- d spins in $(\text{Benzo-TTFVS})_2 \cdot \text{MX}_4$ ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Ga}; \text{X} = \text{Cl}, \text{Br}$)
 書誌事項 : Journal of Material Chemistry, Vol.15, No.34, 3479-3487 (2005)
 発表日付 : 20050914
- 著者氏名 : Hirokazu Yoshikawa, Hiroshi Noda, Osamu Sato, Masaru Kato, Kazuo Satoh, Tsutomu Yotsuya, and Takekazu Ishida
 論文題名 : Magnetization and vortex profiles in the honeycomb network of Pb
 書誌事項 : Physica C, Vol.426-431 P.108-112 (2005)
 発表日付 : 20051001
- 著者氏名 : Masaki Fujii, Taiji Abe, Hirokazu Yoshikawa, Shigehito Miki, Shuichi Kawamata, Kazuo Satoh, Tsutomu Yotsuya, Masaru Kato, Masahiko Machida, Tomio Koyama, Takahito Terashima, Shigeki Tsukui, Motoaki Adachi, and Takekazu Ishida
 論文題名 : Fabrication of superconducting d-wave dot embedded in an s-wave matrix
 書誌事項 : Physica C, Vol.426-431, P.104-107 (2005)
 発表日付 : 20051001
- 著者氏名 : 原田善之, 入宇田啓樹, 高橋輝一, 中西良樹, 野口悟, 石田武和, 吉澤正人
 論文題名 : 低温・低速度 MBE 法による As-grown MgB_2 膜の作製と臨界電流
 書誌事項 : 低温工学, Vol.40, No.11, pp. 479-486 (2005)
 発表日付 : 20051101
- 著者氏名 : Masahiko Machida, and Tomio Koyama
 論文題名 : Structure of a Quantized Vortex near the BCS-BEC Crossover in Atomic Fermi Gas
 書誌事項 : Physical Review Letters, Vol.94, 140401-1~4 (2005)
 発表日付 : 20050415
- 著者氏名 : Masahiko Hayashi
 論文題名 : Differential geometry and morphology of graphitic carbon materials
 書誌事項 : Physics Letters A, Vol.342, P.237-246 (2005)
 発表日付 : 20050531
- 著者氏名 : Masahiko Hayashi, Hiromichi Ebisawa, and Kazuhiro Kuboki
 論文題名 : Superconductivity on a Moeius strip: Numerical studies of order parameter and quasiparticles
 書誌事項 : Physical Review B, Vol.72, pp. 024505_1-7 (2005)
 発表日付 : 20050705

(2) 特許出願

H17 年度出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 4 件)