

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K13979

研究課題名(和文) 3次元ベクトル磁場走査型SQUID顕微鏡の開発

研究課題名(英文) 3D SQUID microscope for sensing vector magnetic fields

研究代表者

石田 武和 (Ishida, Takekazu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00159732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：SQUID顕微鏡の検出コイルに平行な磁場の成分は計測できない欠点があった。本研究では、Nb多層プロセスCRAVITYを利用して、互いに直交する3つの検出コイルをワンチップで測定可能にする構造を持たせた。大阪府大では、検出コイルと測定試料の相対位置がXYZピエゾで精密に駆動でき、磁場ベクトルが決定できるSQUID顕微鏡のCAD設計を行った。産総研では、大阪府大で設計したベクトル磁場検出のできるSQUID素子の製作を行った。特に、XYZとも試料表面から同じ高さにくるようにした。秋田大では、SQUID顕微鏡の画像解析ソフトウェアに関して、画像処理後の磁束の値がより実測値に近くなるように改良した。

研究成果の概要(英文)：We designed a vector sensor for sensing magnetic fields by using a 3-dimensional (3D) scanning superconducting quantum interference device (SQUID) microscope. A vector sensor consists of three SQUID sensors on the same chip and each SQUID sensor has a pick-up coil for X, Y, or Z direction. Three coils with readout circuits are configured in orthogonal with each other to measure the magnetic field vector. The critical current density J_c of a Josephson junction (JJ) is 320 A/cm^2 and the minimum critical current I_c of JJ becomes $12 \mu\text{A}$. We use an XYZ piezo-driven scanner for controlling the position of the pick-up coils in the range of $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ at low temperatures. The room-temperature electronics has the bandwidth of 6 MHz.

The software for the image processing of the scanning SQUID microscope has been improved so that the estimated magnetic flux after process is close to the true value. A function to calculate the magnetic flux inside an area on the image has been newly provided.

研究分野：総合理工

キーワード：超伝導材料・素子 SQUID素子 走査型顕微鏡 画像処理

1. 研究開始当初の背景

空間磁場分布を知る手法はスピントロニクス発展により、ナノサイズの磁性体、または磁性現象に対する、基礎・応用の面から研究のニーズが高まっている。例えば、強磁性ナノワイヤにおける AFM (原子間力顕微鏡) 磁壁像 (E. Saito *et al.*, *Nature* **432** (2004) 203) が報告されている。研究代表者は、SQUID 顕微鏡を利用して 2 次元磁場分布の研究 (T. Ishida *et al.*, *SUST* **14** (2001) 1128) を推進してきた。従来の顕微鏡はコイルサイズが十分小さく出来ないため、解像度は 10 μm 程度に留まっていた。この方法は、センサーコイル自体のマイクロな形状因子や、コイルと試料との隔たり等を、精密に解析し、数値化することによって、高精度な画像の逆変換 (M. Hayashi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **100** (2012) 182601.) で鮮明な画像を得ることに成功し、コイルサイズの制限を超えて 2 μm (走査ステップ因子 2 程度) の分解能を実現した。特許 (登録特許 4775632)、出願中 (特願 2011-197707) もある。

2. 研究の目的

SQUID 顕微鏡は高性能の磁場測定装置として知られ、検出コイルに垂直に交差する磁場成分を測定できるが、検出コイルに平行な磁場の成分は計測できない欠点があった。本研究では、世界最高 Nb 多層プロセス CRAVITY を利用して、互いに直交する 3 つの検出コイルをワンチップ上に構築し、磁場ベクトル測定を可能にする革新的構造を持たせた。大阪府大では、検出コイルと測定試料の相対位置が XYZ ピエゾ駆動でき、磁場ベクトル空間分布が決定できるベクトル SQUID 顕微鏡の開発を目指した。秋田大では、行列の特異値分解を装備した逆変換アルゴリズムを開発し、SQUID 顕微鏡システムに実装し、磁場空間分解能 (XY) の向上を目指した。本研究は、SQUID 素子作製、XYZ 走査系実装、アルゴリズム開発まで一貫して扱い、3 次元ベクトル磁場が計測できる SQUID 顕微鏡システムの完成を目的とした。

3. 研究の方法

XYZ の 3 軸を高精度走査できる極低温走査系を LabVIEW で構築し、対抗位置に SQUID 検出 3 コイルを実装する。世界初のベクトル SQUID 検出コイルは、Nb 多層化プロセスの基板と平行面内でのコイル面 (Z 軸) を形成し、Nb 層間コンタクトホールを組合せて基板方向 (X 軸、Y 軸) 直交 2 検出コイルを作る。検出はトランス結合化、グラジオメーター化、低インダクタンス化、低雑音化、高速動作化で独自の工夫をし、市販品と比べて格段に高い性能を実現する。「行列の特異値分解」という方法を用いて、試料外部に磁場を作り出す実質的な 3 次元磁化分布を再構成できる新規なアルゴリズムを開発する。

XYZ 走査系は石田 (代表)、宮嶋 (連携)、

SQUID 設計は前澤 (分担)、宮嶋 (連携)、SQUID 素子の製作は日高 (連携)、SQUID 素子評価は石田 (代表)、新規アルゴリズム開発は林 (分担) が担当した。

走査型 SQUID 顕微鏡の画像解析を行う際には、画像に含まれるノイズの増幅を抑えるために、逆変換をとときに短波長側での成分をフィルターによって除去することによって磁束の絶対値も影響を受け、真の値からずれてしまう点が問題であった。本研究では、特に長波長側において、磁束の絶対値をより正確に表すようにフィルターに用いる係数の改良により、超伝導量子磁束など物理的に値の決まった量を測定することによって、フィルターの校正を行う。また、それを行う際の便宜のために、観測した画像から領域を指定して磁束の値を求める機能を新たに付与するソフトウェアの改良を行った。

4. 研究成果

本研究では、Nb 多層プロセス CRAVITY を利用して、互いに直交する 3 つの検出コイルをワンチップで、磁場ベクトル測定を可能にする構造を持たせた。大阪府大では、検出コイルと測定試料の相対位置が XYZ ピエゾで精密に駆動でき、磁場ベクトル空間分布が決定できるベクトル SQUID 顕微鏡の CAD 設計を行った。秋田大では、行列の特異値分解法による逆変換アルゴリズムを開発し、SQUID 顕微鏡システムのデータ処理に用いた。産総研では、大阪府大で設計したベクトル磁場検出のできる SQUID 素子の製作を行った。

大阪府大では、XYZ の 3 軸を高精度走査できる極低温走査系を LabVIEW で構築するために新しく X 軸駆動のステージを購入した。XY 軸については既設のものを用いた。SQUID 検出用の 3 コイル方式のベクトル磁場検出 SQUID 素子は産総研の Nb 多層化プロセスの基板と平行面内でのコイル面 (Z 軸) を形成し、Nb 層間コンタクトホールを組合せて基板方向 (X 軸、Y 軸) 直交 2 検出コイルを作製した。特に、XYZ とともに試料表面から同じ高さにくる工夫を行った。検出は、トランス結合化、グラジオメーター化、低インダクタンス化、低雑音化、高速動作化で工夫をし、市販品と比べて高い性能が期待できる構造とした。

「行列の特異値分解」という方法を用いて、試料外部に磁場を作り出す実質的な 3 次元磁化分布を再構築できる新規なアルゴリズムを開発し、SCILAB 言語で完成させた。また、データ処理でも磁束の絶対が評価できるように工夫をした。新規の SQUID 顕微鏡での測定は間に合わなかったが既設の SQUID 顕微鏡と超伝導微小板を用いて測定した磁束分布データを用いて、ソフトウェアが有効に機能することを確かめた。今回のソフトウェア上の改良は、走査型 SQUID 顕微鏡における画像処理を物理現象の測定に利用する際に必要となる磁束測定の精度向上に向けての進歩である。今後は、実際の測定を通して、ソ

フウェアの高精度化を図る必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

①H. Miyoshi, M. Kato, H. T. Huy, V. T. Dang, H. Matsumoto, N. Fujita, T. Ishida, Ginzburg-Landau calculations of star-shaped $\text{Mo}_{80}\text{Ge}_{20}$ superconducting small plates, *Physics Procedia* **81** (2016) 89-92. DOI:10.1016/J.PHPRO.2016.04.035. 査読有

②V. T. Dang, H. T. Huy, S. Miyajima, H. Matsumoto, H. Miyoshi, T. Okamoto, T. Ishida, M. Maezawa, M. Hidaka

Ginzburg-Landau calculations of circular $\text{Mo}_{80}\text{Ge}_{20}$ plates with sector defect, *Physics Procedia* **81** (2016) 93-96. DOI:10.1016/j.phpro.2016.04.036. 査読有

③V. T. Dang, H. T. Huy, S. Miyajima, H. Matsumoto, H. Miyoshi, T. Okamoto, T. Ishida, M. Maezawa, M. Hidaka, Scanning SQUID Microscope for Sensing Vector Magnetic Field, *IEEE Xplore Superconductive Electronics Conference (ISEC)*, 査読有、**DR-P21** (2015) 1-3.

④N. Fujita, M. Kato, T. Ishida, Twin boundary effects on spontaneous half-quantized vortices in superconducting composite structures (d-dot' s), *Physica C*, **518**, 44-46 (2015). 査読有

[学会発表] (計 20 件)

①松本仁志, Ho Thanh Huy, 岡本拓人, 三吉大樹, Vu The Dang, 伊藤厚稀, 加藤勝, 林正彦, 石田武和

人工ピン止めを導入したアモルファス $\text{Mo}_{80}\text{Ge}_{20}$ の渦糸分布 III、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 21 日、東北学院大学、宮城県仙台市

②藤田憲生, 加藤勝, 石田武和
d-dot' において双晶境界により生じうる分数自発磁束の理論解析、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 21 日、東北学院大学、宮城県仙台市

③藤田憲生, 加藤勝, 石田武和
双晶境界が超伝導複合体 d-dot' における半整数量子磁束に及ぼす影響の理論解析

第 23 回渦糸物理国内会議「超伝導体における渦糸状態の物理と応用(2015)」2015 年 12 月 7 日～9 日、休暇村志賀島、福岡市

④林正彦, 石田武和
走査型 SQUID 顕微鏡の観測画像における画像処理と磁束の評価について

第 23 回渦糸物理国内会議「超伝導体における渦糸状態の物理と応用(2015)」2015 年 12 月 7 日～9 日、休暇村志賀島、福岡市

⑤H. T. Huy, V. T. Dang, H. Matsumoto, H.

Miyoshi, A. Ito, H. Shishido, M. Kato, T. Ishida

How does a small Pacman eat vortices?
第 23 回渦糸物理国内会議「超伝導体における渦糸状態の物理と応用(2015)」2015 年 12 月 8 日、休暇村志賀島、福岡市

⑥V. T. Dang, H. Matsumoto, H. Miyoshi, A. Ito, T. Okamoto, H. T. Huy, H. Shishido, M. Kato, T. Ishida

Vortex configuration in a Star-Shaped $\text{Mo}_{80}\text{Ge}_{20}$ plate with a pin

第 23 回渦糸物理国内会議「超伝導体における渦糸状態の物理と応用(2015)」2015 年 12 月 7 日、休暇村志賀島、福岡市

⑦H. T. Huy, H. Matsumoto, A. Ito, V. T. Dang, H. Miyoshi, S. Miyajima, H. Shishido, M. Kato, T. Ishida

Observations of vortices in circular $\text{Mo}_{80}\text{Ge}_{20}$ plates with sector defect

8th International Symposium on Superconductivity (ISS2015)、2015 年 11 月 16 日～18 日、Tower Hall Funabori、東京

⑧V. T. Dang, H. T. Huy, H. Matsumoto, H. Miyoshi, S. Miyajima, H. Shishido, M. Kato, T. Ishida

Ginzburg-Landau calculations of circular $\text{Mo}_{80}\text{Ge}_{20}$ plates with sector defect.

8th International Symposium on Superconductivity (ISS2015)、2015 年 11 月 16 日～18 日、Tower Hall Funabori、東京

⑨N. Fujita, M. Kato, T. Ishida
Twin boundary effects on spontaneous half-quantized vortices in superconducting composite structures (d-dot' s) II.

8th International Symposium on Superconductivity (ISS2015)、2015 年 11 月 16 日～18 日、Tower Hall Funabori、東京

⑩H. Matsumoto, H. T. Huy, H. Miyoshi, A. Ito, V. T. Dang, M. Kato, T. Ishida

Vortex distribution in amorphous $\text{Mo}_{80}\text{Ge}_{20}$ plates with artificial pinning centers.

8th International Symposium on Superconductivity (ISS2015)、2015 年 11 月 18 日、Tower Hall Funabori、東京

⑪H. Miyoshi, M. Kato, H. T. Huy, V. T. Dang, H. Matsumoto, N. Fujita, T. Ishida

Ginzburg-Landau calculations of star-shaped $\text{Mo}_{80}\text{Ge}_{20}$ superconducting small plates.

8th International Symposium on Superconductivity (ISS2015)、2015 年 11 月 18 日、Tower Hall Funabori、東京

⑫三吉大樹, 加藤勝, Ho Thanh Huy, 松本仁志, Vu The Dang, 藤田憲生, 林正彦, 石田武和

非線形 Ginzburg-Landau (GL) 方程式による $\text{Mo}_{80}\text{Ge}_{20}$ 五芒星微小板の磁束分布計算と実験との比較、日本物理学会 2015 年秋季大会、

2015年9月19日、関西大学、大阪府吹田市
⑬藤田憲生, 加藤勝, 石田武和, 小山富男
超伝導複合体 d-dot を用いた量子ゲート :
Landau-Zener 遷移によるアダマールゲートの
構成、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015
年9月19日、関西大学、大阪府吹田市
⑭藤田憲生, 加藤勝, 石田武和
超伝導複合体 d-dot における半整数磁束発生
への双晶境界の影響 III、日本物理学会 2015
年秋季大会、2015 年9月18日、関西大学、
大阪府吹田市
⑮松本仁志, Ho Thanh Huy, 岡本拓人, 三吉
大樹, 伊藤厚稀, Vu The Dang, 加藤勝, 林
正彦, 石田武和
人工ピン止めを導入したアモルファス
Mo₈₀Ge₂₀ の渦糸分布 II、日本物理学会 2015
年秋季大会、2015 年9月18日、関西大学、
大阪府吹田市
⑯V. T. Dang, H. Matsumoto, H. Miyoshi, H.
T. Huy, H. Shishido, M. Kato, T. Ishida
Vortex Distribution in Small Star-Shaped
Mo₈₀Ge₂₀ Plate.
Ninth international conference in school
format on Vortex Matter in nanostructured
Superconductors、(VORTEX IX)、2015 年9月
16日、Aldemar Resorts Amilia Mare, Rhodes,
Greece
⑰N. Fujita, M. Kato, T. Ishida
Effects of twin boundaries on spontaneous
half-quantized vortices in
superconducting composite Structures
(d-dot' s).
12th European Conference on Applied
Superconductivity、2015年9月6日~10日、
Lyon Convention Center、Lyon, Franc
⑱V. T. Dang, H. T. Huy, S. Miyajima, H.
Matsumoto, H. Miyoshi, T. Okamoto, T.
Ishida, M. Maezawa, M. Hidaka
Scanning SQUID Microscope for Sensing
Vector Magnetic Field.
15th International Superconductive
Electronics Conference (ISEC 2015)、2015
年7月9日、名古屋大学、愛知県名古屋市
⑲N. Fujita, M. Kato, T. Ishida
Twin boundary effects on spontaneous
half-quantized vortices in
superconducting composite structures
(d-dot' s)
15th International Superconductive
Electronics Conference (ISEC 2015) 2015
年7月6日~9日、名古屋大学、名古屋能楽
堂、愛知県名古屋市
⑳H. Matsumoto, H. Miyoshi, T. Okamoto, V.
T. Dang, H. T. Huy, S. Miyajima, H.
Shishido, M. Kato, N. Fujita, M. Hayashi,
T. Ishida
Highly doped organic-inorganic hybrid
materials for memory and laser
applications. Vortices in Small Concave
Decagon Mo₈₀Ge₂₀ Plate.

Advances in Studies of Superconducting
Hybrids: Theory and Modeling vs Experiment
2015年5月17日、Hotel le Dauphin, Arcachon,
France

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

国立研究開発法人産業技術総合研究所の CRAVITY に
関しては、次の WEB サイトをご参照ください。
<https://unit.aist.go.jp/neri/cravity/ja/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 武和 (ISHIDA, Takekazu)
大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・
教授
研究者番号 : 00159732

(2) 研究分担者

前澤 正明 (MAEZAWA, Masaaki)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナ
ノエレクトロニクス研究部門・主任研究員
研究者番号 : 40357976
林 正彦 (HAYASHI, Masahiko)
秋田大学・教育文化学部・教授
研究者番号 : 60301040

(3) 連携研究者

日高 睦夫 (HIDAKA, Mutsuo)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナ
ノエレクトロニクス研究部門・上級主任研
究員
研究者番号 : 20500672
宮嶋 茂之 (MIYAJIMA, Shigeyuki)
大阪府立大学・客員研究員
研究者番号 : 50708055