

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02195

研究課題名 (和文) Si微細加工プロセスによる量産型コンパクト超電導磁気エネルギー貯蔵デバイスの開発

研究課題名 (英文) Development of compact superconducting magnetic energy storage devices for volume demand based on the silicon microfabrication technology

研究代表者

元廣 友美 (MOTOHIRO, Tomoyoshi)

名古屋大学・未来社会創造機構・客員教授

研究者番号：20394421

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要 (和文) : 4インチSiウェハに断線率低減を狙い、3段溝/横連結構造144角平面螺旋溝 (全長100m) を作成した。この溝に埋め込むYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (Y123) を腐食しない均熱化用Cuめっき法を開発した。Y123を埋め込んだ平面螺旋溝超電導コイル積層体につき、磁場計算で、従来の超電導コイルの10倍以上、スーパーキャパシタに迫る蓄電密度を確認した。Si上Y123膜の室温抵抗が最も下がるO<sub>2</sub>分圧・熱処理を見出し、この条件でSrTiO<sub>3</sub>単結晶上スパッタ/MOD-Y123膜のT<sub>c</sub>=90K超電導転移を確認したが、Si上では、90K付近での僅かな抵抗減少に留まり、完全な超電導転移とならず課題が残った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本構想の、従来の十倍以上の蓄電体積密度をもつコンパクト超電導蓄電コイルが実現すると、二次電池では対応できない急速充放電に対応できる車載用等のコンパクトな蓄電装置に応用できる。たとえば、移動する雷雲を追いながら耐雷ドローンで誘雷し、車載蓄電装置に蓄電する落雷制御・蓄電技術が開発されているが、超電導蓄電コイルは、対応できる数少ない技術候補の一つである。冷却の必要性を考慮しても、超電導蓄電コイルのエネルギー損失は低く、コンパクト化ができれば、近年の冷凍装置の小型化・高効率化と相まって応用の展開が期待される。

研究成果の概要 (英文) : A 3-stepped, parallel-connected, 144-gon, plane spiral groove of total length 100 m was fabricated on a 4" Si wafer under the design to decrease coil disconnections in the groove. A new Cu plating method which does not cause corrosion of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (Y123) was developed. Electricity storage density of a stack of Si wafers with the plane spiral grooves stuffed with Y123 was estimated by calculation of magnetic fields. It was estimated to be one order or more than that of conventional ones, approaching those of supercapacitors. The O<sub>2</sub> partial pressure and temperature for thermal processes in which the room temperature electric resistivity of Y123 films on Si substrates takes the minimum were obtained. Getting through these thermal processes, sputter-/MOD-deposited Y123 films on SrTiO<sub>3</sub> single crystals showed a clear superconductive transition at 90K. However, they only showed a small resistivity decrease around 90K on Si without showing a clear superconductive transition.

研究分野：物理工学

キーワード：超電導磁気エネルギー貯蔵 シリコン微細加工技術 (MEMS) 銅めっき スパッタ成膜技術 MOD成膜技術 極低温冷凍機 化学機械研磨 (CMP) 磁場計算

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

### [再生可能エネルギー利用に関する背景]

変動の多い再生可能エネルギーの利用には蓄電装置が不可欠だが、電極へのイオンの出入り・化学変化を伴う二次電池は長期使用インフラとしては不安があり、物理現象に基づき急速充電にも対応可能な、超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)が適する。しかし、従来型 SMES は、超電導電流により発生する①電磁応力(hoop 力)に耐える力学構造、②磁気遮蔽構造、③熱伝導性・電気伝導性に優れた Cu 線(stabilizer)と NbTi 等の超電導線の複合ケーブルの曲げ半径の下限、等の制約により大型化し、冷却設備を含め貯蔵電力密度  $w$  は 1Wh/L 以下、スーパーキャパシタの 5.7-7.5[Wh/L]に劣る。

そこで、 $\phi 76.2$  mm Si ウェハに微細加工技術を用いて形成した螺旋溝に超電導 NbN 薄膜を充填、stabilizer として Cu をめっきし、化学機械研磨法(CMP)により溝外の堆積物を除去して、螺旋溝内に高密度の超電導コイルを形成した。螺旋溝壁の Si の力学強度で hoop 力に耐える。超電導転移温度  $T_c=15.5$  K 以下で、平面螺旋コイルを流れる超電導電流による磁場の発生および 0.1 mJ の電力エネルギーの貯蔵の原理実証を経て、多層配線技術で複数の平面螺旋コイルを直列接続で積層し、冷凍機と組み合わせたコンパクト SMES ユニットの構築した。  $w=1.8$  Wh/L が期待できる。半導体プロセスで自動化が可能で、品質管理も容易で、近年極低温冷凍機の小型化高性能化を背景に、量産・低コスト化が期待できる。

### [落雷制御・蓄電技術に関する背景]

一方、開発が進められる誘雷・蓄電技術[1]では、耐雷ドローンで雷雲に近づき、誘雷して地上に短絡し、落雷による設備や人への被害を防ぎ、さらに地上の車両に搭載した蓄電装置に導いて蓄電、利用する検討が行われている。数十 kA で数十  $\mu$  秒程度の落雷のパルス電流の急速充電は二次電池では不可能なため、コンパクトな SMES は数少ない選択肢の一つとなる。

## 2. 研究の目的

### [超電導材料の変更]

コンパクト SMES の実用化には、NbN を、液体窒素温度 (70K) 以上で稼働でき臨界電流密度の大きい銅酸化物高温超電導体 Y123 ( $T_c=90$  K) に代替する必要がある。これまで良好な Y123 薄膜は、パルスレーザーデポジション法等の高エネルギー堆積粒子を SrTiO<sub>2</sub>(STO)等の単結晶基板上で活発な表面移動のもとエピタキシャル成長させることで得られている。本構想では溝内に堆積させるため溶液中にウェハを浸すディップコーティングをベースとする MOD 法が好ましい。MOD 法による Y123 薄膜の STO(100)単結晶基板上への配向成長の報告はあり、近年、塩酸添加プロピオン酸塩 (Y : Ba : Cu = 1 : 2.1 : 3.15 + HCl 0.1) の特殊な MOD 液を用い、CeO<sub>2</sub>/YSZ バッファ層を介して Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> コートした鋼材上への成膜が報告されている。塩酸添加により析出物 Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>Cl を介して Y123 の成長が促進されることで、通常 800°C 台での本焼成が 720-740°C で可能とされている。Si 基板の場合、堆積後の高温酸化時の Ba 拡散抑制のためバッファ層の挿入が必要となる。また、螺旋溝形成の最後に表面酸化で、溝壁スキヤロップ突起部を平坦化する必要があり、実質上厚さ 1  $\mu$ m の非晶質 SiO<sub>2</sub> 上に Y123 を配向成長する必要がある。

[平面螺旋コイルの積層技術実証] さらに、少なくとも  $\phi 101.6$  mm Si ウェハ 2 枚の平面螺旋コイルを via hole 埋め込みを介した超電導コイルの直列接続の技術実証が必要と考えた。

[平面螺旋コイル加工技術の改良] 一方、通常 1 ウェハ上に分割形成された半導体素子の歩留まりは 90%程度だが、本構想の平面螺旋コイルは、1 ウェハ全体で 1 素子であり、どこか一か所に塵による断線が生じても素子が機能しなくなるので対策が必要である。

[stabilizer 用 Cu めっき技術の改良] また、通常の Cu めっきは Y123 薄膜を腐食するため、めっき法の改良が必要である。

## 3. 研究の方法

### [平面螺旋コイル加工技術の改良]

$\phi 101.6$  mm Si ウェハに形成する螺旋溝を、上方に  $\pm 45^\circ$  開口し Y123 を充填し易い、1 段 8  $\mu$ m の 3 段溝とし、製作時のパターン形成で 1 段分の欠陥があっても残りの 2 段分で平面螺旋コイルの断線を防ぐこととした。1 サイクル当りの Bosch 法による Si エッチング量を 200 nm とし、壁面のエッチング痕(凹凸スキヤロップ)を緩和した。半径が少しずつ変化する 1/4 円弧相当の多角形を順次接続して、1 周すると 72 または 60  $\mu$ m だけ広がる螺旋溝を形成した。Y123 の配向充填には、トレンチ溝の表面性状・形状について (1)表面粗さができるだけ少なく(壁面でも Ra 30 nm 程度)、(2)コーナ部での角度変化は 3°以下の滑らかな形状であること、が必要と判断した。これを踏まえ、以下の 3 種類のコイル状トレンチ製作を進めた。

- ①  $\phi 101.6$  mm Si ウェハに 36 角形 3 段溝の一筆書き平面螺旋溝(全長 85 m)を形成する。
- ② 螺旋ピッチをさらに細かくし、2.5°ずつ溝が曲がり頂点の数が 4 倍となる 144 角形 3 段溝の一筆書き平面螺旋溝(全長 102 m)とし、Y123 堆積時の応力集中を抑制、膜質

の向上と断線の低減を図る。

- ③ 断線一箇所が致命的となる一筆書き螺旋を廃し、溝7本を並列化、144角形3段溝の7本並列平面螺旋溝（7本合わせて全長89m）の所々を阿弥陀籤状に横連結し断線部をパイパスしてコイルの断線不良・歩留り低減を回避する対策をとった。

[平面螺旋コイルの積層技術実証]

2枚の平面螺旋コイルを直列接続する技術の前段として、1枚のSiウェハの表裏に形成した平面螺旋コイルを、貫通穴を介して接続する方法を構想した。

[stabilizer用Cuめっき技術の改良]

N触媒付与工程、還元処理工程、無電解Cuめっき浴に使用する様々な薬品についてY123膜に対する腐食性を検討、PdCl<sub>2</sub>-Arginine錯体溶液による触媒付与、DMAB（商品名）による還元処理、無電解Cuめっき浴でのPB506（商品名）の使用で、Y123膜への無電解Cuめっき、硫酸Cuめっき浴で不純物の無い電気Cuめっきができる感触を得た。この方向で検討を進めることとした。

#### 4. 研究成果

[平面螺旋コイル加工技術の改良]：前記①②③を完成した。

[stabilizer用Cuめっき技術の改良]

##### (1) 無電解Cuめっき

基本無電解めっき工程によるCu被膜形成：Pd-Arginine錯体による触媒付与と還元処理(DMAB)により、めっき時間30分で完全被覆ではないが最も良好なCu被膜が形成された。  
自己組織化単分子膜による無電解Cuめっき：上記のPd触媒付与を促進するため、末端のアミノ基(-NH<sub>2</sub>)がPdと錯体形成するp-aminophenyltrimethoxysilaneによる自己組織化単分子膜をY123上に形成し、均一なCu被膜の析出が見られた。

Agナノ粒子触媒を併用した無電解Cuめっき：Pd触媒付与に先立ち、Pd粒子径約100nmより小さい31±5nmの粒径をもつAgナノ粒子触媒を付与し、Y123基板の凹凸部の被覆率の向上に努めたところ、高密度にCu粒子が析出した無電解Cuめっきができた。

##### (2) ストライクめっき

Agナノ粒子+Pd触媒付与でえられた比較的被覆率の高い無電解Cuめっき膜上に、pH=13.0のアルカリ性めっき浴で通常の電気めっきより高電流1.5A/dm<sup>2</sup>で60秒処理する、ストライクCuめっきで平均膜厚0.78μmの完全被覆を達成できた。

##### (3) 電気めっき

ストライクCuめっきでY123の完全被覆を達成できたため、硫酸を50g/L添加しためっき浴で60分間電気めっきを行い、光沢のある平滑なCu被膜が形成された。膜厚測定の結果、10点平均で28.9μmであり、平均段差は約140nmで、無電解Cuめっき表面の平均段差380nmより平滑性が向上した。テープ試験での剥離もなく、一定の密着性を有していることを確認した。

[超電導材料の変更]

これまで報告されている知見を手掛かりに以下の結果を得ている。

- ① ø76.2mm (3インチ) YSZターゲットを平板マグネトロンカソードに設置し、基板-ターゲット間距離50mmで対面したSi(100)基板に、Arガス流量: 50sccm、スパッタArガス圧: 5Pa、基板裏面ヒーターを800°Cに設定して基板表面実温度575°Cで3時間スパッタ成膜し、X線回折により(100)配向YSZ膜(厚さ500nm)が得られたことを確認した。
- ② ø76.2mm (3インチ) CeO<sub>2</sub>ターゲットを設置し、基板-ターゲット間距離50mmで対面した①のSi(100)基板/(100)配向YSZ膜(厚さ500nm)上に、①と同様にスパッタ成膜し、X線回折により(100)配向CeO<sub>2</sub>膜(厚さ500nm)が得られたことを確認した。
- ③ ø76.2mm (3インチ) Y123ターゲットを設置し、②のSi(100)基板/(100)配向YSZ膜(厚さ500nm)/(100)配向CeO<sub>2</sub>膜(厚さ500nm)上に、Arガス流量: 2sccm、O<sub>2</sub>ガス流量: 10sccm、スパッタAr+O<sub>2</sub>混合ガス圧: 24Pa、基板裏面ヒーターを800°Cに設定した上、基板表面斜めからターゲットの横に設置した補助ランプ加熱ヒーターによる加熱を行うことにより基板表面実温度670°Cで3時間スパッタ成膜し、厚さ100nmのY123膜を得、基板加熱後の冷却過程でO<sub>2</sub>ガス90000Pa中アニールを行った。得られた試料からはY123のX線回折ピークは観測されなかった。
- ④ ③のSi(100)基板/(100)配向YSZ膜(厚さ500nm)/(100)配向CeO<sub>2</sub>膜(厚さ500nm)/Y123膜(厚さ100nm)に酢酸塩系MOD液(株高純度化学 YBC-5)で、Y123をディップコートにより成膜した(厚さ200nm)。12時間大気中放置したのち、石英環状炉を用い、大気中で4時間45分かけて350°Cまで加熱し、350°Cで30分保持後徐冷して、ディップコート膜の仮焼を行った後、O<sub>2</sub>:10Pa (N<sub>2</sub>バランス)、温度T<sub>h</sub>で1.5時間本焼成を行い、さらに500°C、1時間純酸素雰囲気中で酸素処理を行った。T<sub>h</sub> ≥ 830°Cでは、高温/低酸素分圧条件で発生するとされるBaCeO<sub>3</sub>が見られた。T<sub>h</sub> = 733°C、でY123のX線回折ピークを観測した。
- ⑤ ③のSi(100)基板/(100)配向YSZ膜(厚さ500nm)/(100)配向CeO<sub>2</sub>膜(厚さ500nm)/Y123膜(厚



さ 100nm)にプロピオン酸塩系 MOD 液(株高純度化学 特注、塩素無添加)で Y123 をディップコートにより成膜した(厚さ 200nm)。12 時間大気中放置したのち、石英環状炉を用い、ディップコート膜の仮焼を行った後、 $O_2:10Pa$  ( $N_2$  バランス)、温度  $T_h$  で 1.5 時間本焼成を行い、さらに  $500^\circ C$ 、1 時間  $O_2$  雰囲気中で熱処理した。 $T_h \geq 830^\circ C$  では、高温/低酸素分圧条件で発生するとされる  $BaCeO_3$  が見られた。 $T_h = 713^\circ C$ 、 $733^\circ C$ 、 $753^\circ C$  の 3 条件では、a,c 軸混合配向の X 線回折パターンが観測された(c 軸より a 軸配向の傾向が強い)。また、回折角  $2\theta = 12.7^\circ$ 、 $25.7^\circ$  に回折ピークが観測され、そのピーク強度は  $T_h = 713^\circ C > 733^\circ C > 753^\circ C$  の順に弱くなった。このピークについては Y123 成長を助長する析出物  $Ba_2Cu_3O_4Cl_2$  であると報告されているが、 $Ba_2Cu_3O_{6-x}$  も同じ回折角  $2\theta = 12.7^\circ$ 、 $25.7^\circ$  に回折ピークが現れるので、塩素無添加の本条件では、 $Ba_2Cu_3O_{6-x}$  に起因すると考えられる。なお、ディップコートの際の基板への MOD 液の濡れ性を向上するため、酢酸系 MOD 液の場合には通常酢酸ブチルで 1:1 に希釈するが、プロピオン酸系の場合にはプロピオン酸で 1:1 に希釈した。

- ⑥ 塩酸添加 MOD 液は不安定でメーカーより入手できなかったが、プロピオン酸系 MOD 液にジクロロ酢酸(DCA)を添加し、Y:Ba:Cu:Cl=1:2.1:3.15:0.1 としたものを、2 週間以内に使用との条件付きで入手できた(株高純度化学 YBC-Cl)。この MOD 液を入手直後の新鮮なうちに、ディップコートし、⑤と同じ条件で仮焼・本焼成を行ったところ、a,c 軸混合配向膜(a>c)が得られた。この場合も、回折角  $2\theta = 12.7^\circ$ 、 $25.7^\circ$  に回折ピークが観測され、そのピーク強度は  $T_h = 713^\circ C > 733^\circ C > 753^\circ C$  の順に弱くなった。本条件では Cl が入っているため析出物  $Ba_2Cu_3O_4Cl$  が析出し Y123 成長を助長した可能性がある。本試料は冷却に伴い電気抵抗増加したが、45.5K で抵抗がゼロとなり超電導転移を示した。

過去の報告で⑥と同様の特性 ( $T_c=57K$ ) の a,c 軸混合配向膜(a>c)で、アニール時の酸素分圧をさらに低減して  $T_c=88K$  が達成されている。本件試料もアニール時の酸素分圧をさらに低減することにより  $T_c=88K$  を達成することができると考えた。しかしながら、DCA 添加のプロピオン酸系 MOD 液 YBC-Cl は、経時変化が激しく、なかなか再現性のある実験が難しかった。そこで実験条件の再確認を行った。

#### [Y123 スパッタ成膜時の基板加熱に関する課題と対応]

基板加熱による基板と Y123 膜の相互拡散の懸念を除くため、厚さ 100 nm であった Y123 膜は成膜時間を 10 倍に伸ばし厚膜化した。さらに、基板ホルダ裏面からの基板加熱も行わず、成膜後のスパッタチャンバ内での  $O_2$  雰囲気下でのアニールも止め、環状炉で、図 1 挿入図に示すように、次の条件で熱処理を行った。

- ① 2 連マスフローコントローラを用いて Ar ガスと所定濃度の Ar+ $O_2$  混合ガスを環状炉に流し、 $O_2$  分圧  $x Pa$  (残りは Ar で合計 1 気圧)のガス流雰囲気を作る。
- ② 環状炉内に試料を入れ、室温から  $T_1=720^\circ C$  まで 1.5 時間かけて温度を上げる。
- ③ 上記雰囲気、 $T_1=720^\circ C$  で  $t_1=4.5$  時間保持する。
- ④ 上記雰囲気で  $T_1=720^\circ C$  から室温まで 1 時間かけて温度低下させる。
- ⑤ 1 気圧の  $O_2$  流に切り替え、 $t_2=3$  時間保持する。
- ⑥ 1 気圧の  $O_2$  流のまま自然冷却する。

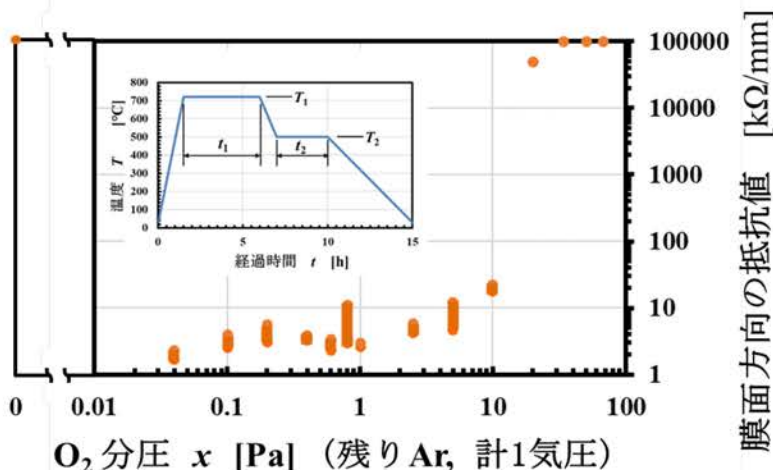


図 1 熱処理パターン:  $T_1=720^\circ C$ 、 $t_1=4.5 h$ 、 $T_2=500^\circ C$ 、 $t_2=3.0 h$ (挿入図参照)による熱処理後の抵抗値の  $O_2$  分圧  $x$  依存性。性を図 1 に示す。膜面内方向の抵抗値は、 $O_2$  分圧  $x$  が 10 Pa を下回ると数 k $\Omega$  台に小さくなるが、 $x$  が 0 Pa では、再び数十 M $\Omega$  以上になった。また、膜面内方向の抵抗が低い  $O_2$  分圧の領域で、Y123 の結晶性向上を狙い  $T_1=800^\circ C$ 、あるいは  $t_2=5$  時間に延長した場合、抵抗値は 100 M $\Omega$  以上に増加した。一方、 $T_1$ 、 $T_2$  をそのままに、 $t_1=1.5$  時間、 $t_2=1.0$  時間に変更しても、抵抗に大きな変化はなかった。

#### [Y123 成膜試料の抵抗の温度依存性評価]

図 1 の結果を踏まえ、Si 基板に替えて 10 mm $\square$  の  $SrTiO_3$ (STO)単結晶(100)基板に Y123 膜を成膜し、図 1 と同じ  $x=0.04 Pa$  の条件で、熱処理を行った。抵抗値の温度依存性を測定した結果、図 2(a)のように。温度降下とともに抵抗が減少し、90K 付近で抵抗がゼロになり超電導転移を示した。図 1 では室温で膜面方向の抵抗値は k $\Omega/mm$  台であったが、図 2(a)では  $\Omega/mm$  台となって



いる。そこで、同じプロセスで作成した Y123/単結晶基板に、さらに MOD 法による Y123 膜の厚膜化を試みた。STO 基板が 10 mm 正方形と小さいため、ディップコートは行わず、水平に置いて MOD 液を滴下し、12 時間室温放置して乾燥させた。12 時間室温放置して乾燥させたのち、環状炉を用い、大気中で 400°C の仮焼を行った。この後、図 1 の本焼成を行ったのち、図 2(a)と同様の抵抗-温度特性を測定した結果を図 2(b)に示す。室温抵抗の絶対値は厚膜化で図 2(a)より減少し、温度降下とともに抵抗はやや上昇、90K 付近で抵抗がゼロになる超電導転移が見られた。

次に Si(100)基板に YSZ (500 nm)、ついで CeO<sub>2</sub> (500 nm) スパッタ成膜した上に、Y123 を 30 時間 (1000 nm) 成膜した試料について、同様の熱処理を行った場合の結果を図 2(c)に示す。室温抵抗は kΩ/mm 台となり超電導転移は見られない。

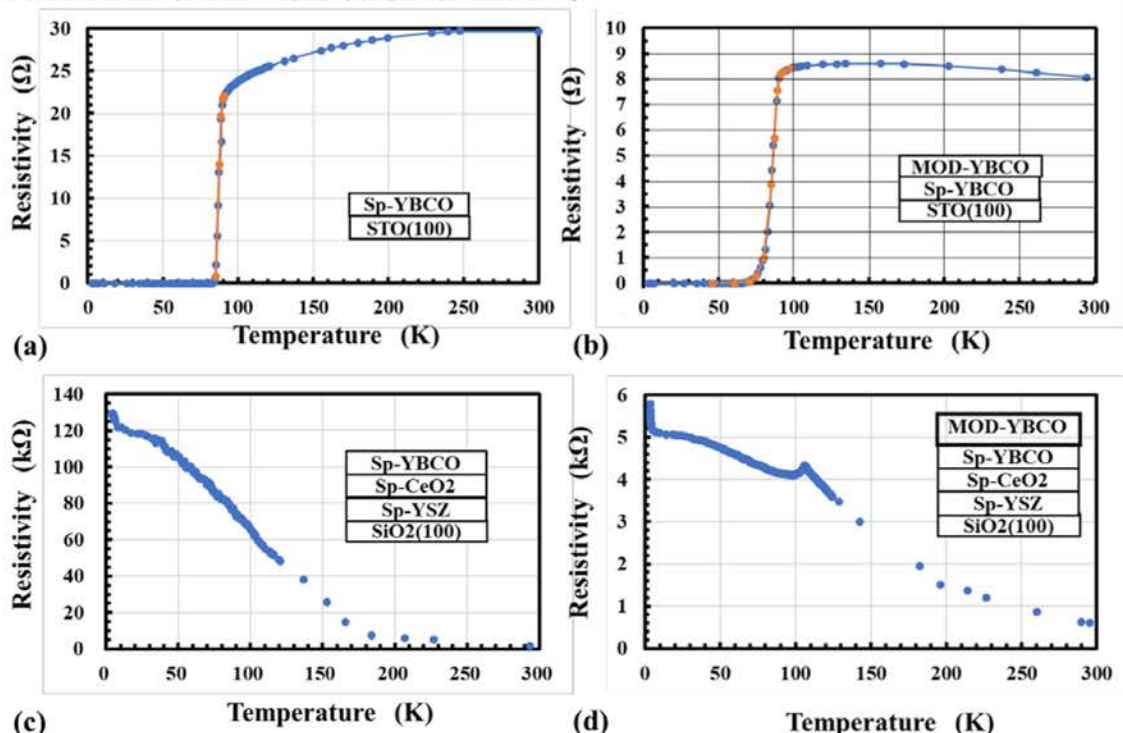


図 2 抵抗-温度特性測定結果: (a) STO(100)単結晶上に Y123 膜をスパッタ成膜(100nm)し、熱処理した試料、 (b) STO(100)単結晶上に Y123 膜をスパッタ成膜(100nm)し熱処理した試料に、MOD 法により Y123 膜を厚塗りし熱処理した試料、 (c) Si(100)基板に YSZ (500 nm)、ついで CeO<sub>2</sub> (500 nm) をスパッタ成膜した上に、Y123 をスパッタ成膜(1000 nm)し熱処理した試料、 (d) Si(100)基板に YSZ (500 nm)、ついで CeO<sub>2</sub> (500 nm) スパッタ成膜した上に、Y123 をスパッタ成膜(1000 nm 相当)し熱処理した試料に、MOD 法により Y123 膜を厚塗りし熱処理した試料

Si(100)基板に YSZ (500 nm)、ついで CeO<sub>2</sub> (500 nm) スパッタ成膜した上に、Y123 を 30 時間 (1000 nm 相当)成膜した試料について、同様の熱処理、MOD 処理を行い仮焼、再度図 1 と同様の熱処理をした試料についての結果を図 2(d)に示す。温度降下とともに抵抗が上昇、100K 付近で一旦抵抗が減少、再び 100K 以上より緩やかに上昇した。この変曲点が膜中の部分的な超電導転移による可能性もあるが、STO 単結晶基板の場合のような明確な超電導転移は見られない。

[コンパクト SMES の性能予測の深化]

コンパクト SMES 構想当初の、Si ウェハに形成した平面螺旋超電導コイルの直列積層遺体接の蓄電容量を、相当する単相ソレノイドコイルに代替し、解析的に求める方法では近似が多く、詳細なコイル設計が出来ないため、平面螺旋コイルを、同じピッチの同軸円環電流に置き換え、発生する磁場の空間分布を計算、さらに積層された異なる平板螺旋コイルによる磁場をすべて加算して、磁場の空間分布を求めた。この磁場が、コイルを流れる電流に印加、臨界電流密度を制限し蓄電密度の上限が決まる。従来の SMES は、1Wh/L 以下であったが、本構想コンパクト SMES は数 Wh/L 級、螺旋溝デザインによってはそれ以上となり、電気二重層キャパシタを凌ぐ蓄電容量となることが示された。Li イオン二次電池の数百 Wh/L 級には及ばないが、急速充電が必須となる用途では重要なデバイスになるものと考えられる。

<引用文献>

1 落雷制御・充電技術 | NTT R&D Website (rd.ntt) <https://www.rd.ntt/research/SE0010.html>  
<https://www.rd.ntt/se/technology/lightning.html> (閲覧2023年5月24日)

2 T. Motohiro, M. Sasaki, J.-H. Noh, O. Takai, Estimation of the electricity storage volume density of the compact SMESs of a new concept based on Si microfabrication technologies, *magnetochemistry* 7 (2021) 44. DOI:10.3390/magnetochemistry7030044

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Motohiro Tomoyoshi, Sasaki Minoru, Noh Joo-hyong, Takai Osamu	4. 巻 7
2. 論文標題 Estimation of the Electricity Storage Volume Density of Compact SMESs of a New Concept Based on Si Microfabrication Technologies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Magnetochemistry	6. 最初と最後の頁 44-1~44-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/magnetochemistry7030044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Motohiro T, Sasaki M, Noh J-H, Takai O, Honma H	4. 巻 1590
2. 論文標題 Estimation of Electricity Storage Density of Compact SMESs Composed of Si-wafer Stacks Loaded with Superconducting Thin Film Coils in Spiral Trenches under the Constraints of the Critical Magnetic Flux Density	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012045-1~-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1590/1/012045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 元廣友美、佐々木 実、盧 柱亨	4. 巻 68(2)
2. 論文標題 微細加工技術を用いた超電導磁気エネルギー貯蔵デバイスの開発における表面処理技術	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 工業材料	6. 最初と最後の頁 66~74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ichiki Y, Ichiki A, Hioki T, Sasaki M, Noh J-H, Takai O, Honma H, Motohiro T	4. 巻 1293
2. 論文標題 Estimation of electricity storage capacity of compact SMESs composed of stacks of Si-wafers loaded with superconducting thin film coils in spiral trenches formed by MEMS process	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012058-1~-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1293/1/012058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 元廣友美	4. 巻 64(6)
2. 論文標題 微細加工技術を用いた超小型超電導磁気エネルギー貯蔵技術の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ケミカルエンジニアリング	6. 最初と最後の頁 412-422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Sasaki, Y. Suzuki, T. Hioki, T. Motohiro	4. 巻 0
2. 論文標題 Stacking 4'' Si Wafer with Parallel 3-Stepped Micro-Trenches to Deposit Superconducting Material for Magnetic Energy Storage	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 2019 6th Int'l Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTD-3D)	6. 最初と最後の頁 79-79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki Minoru, Noh Joo-Hyong, Takai Osamu, Motohiro Tomoyoshi	4. 巻 142
2. 論文標題 100 m-level Spiral Silicon Micro-Trenches with 3-Step Smooth Sidewalls to Deposit Superconducting Material for Miniaturized Magnetic Energy Storage	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 78~84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejsmas.142.78	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計5件 (うち招待講演 0件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 佐々木実
2. 発表標題 マイクロマシン・センサシステム技術委員会の活動について」1-A-p1-1, 企画セッション: スマート社会・ライフサイエンス応用に向けたセンサ・マイクロマシンの研究動向
3. 学会等名 令和2年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Motohiro, M. Sasaki, J.-H. Noh
2. 発表標題 Estimation of Electricity Storage Density of Compact SMESs Composed of Si wafer Stacks Loaded with Superconducting Thin Film Coils in Spiral Trenches under the Constraint of Critical Magnetic Flux Density
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Superconductivity (ISS2019), December 3rd-5th, Kyoto, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sasaki, Y. Suzuki, T. Hioki, T. Motohiro,
2. 発表標題 Stacking 4” Si Wafer with Parallel 3-Stepped Micro-Trenches to Deposit Superconducting Material for Magnetic Energy Storage
3. 学会等名 2019 6th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sasaki, Y. Suzuki, K. Adachi, T. Hioki, T. Motohiro
2. 発表標題 Over 100m Length Single Spiral Silicon Micro-Trench with 3-Step Smooth Sidewalls to Deposit Superconducting Material for Magnetic Energy Storage
3. 学会等名 International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaito Seki, Joo-Hyoung Noh, Yoshio Horiuchi, Osamu Takai, Hideo Honma, Tomoyoshi Motohiro, Tatsumi Hioki, Minoru Sasaki and Taro Arakawa
2. 発表標題 Copper thin film formation on superconductor material for compact SMES using plating method
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Materials Science and Surface Technology (MSST2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

信夫勇佑 「めっき法によるPEEK樹脂樹脂上への銅皮膜パターン形成およびYBCO上への銅皮膜形成」 横浜国立大学理工学府 教物・電子情報系理工学専攻電気電子ネットワーク教育分野 修士論文、令和4年3月11日 （荒川太郎教授、関東学院大学、関東学院大学 材料・表面工学研究所 盧 柱亨教授との共同研究）

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	盧 柱亨  (NOH Joo-hyong)  (50313474)	関東学院大学・総合研究推進機構・教授   (32704)	
研究分担者	佐々木 実  (SASAKI Minoru)  (70282100)	豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授   (33924)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------