

令和元年6月17日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19074

研究課題名(和文) ナノ磁石を用いた環境発電素子の開発とその環境発電への応用

研究課題名(英文) Development of energy harvest elements based on nanomagnet and its applications for environmental IoT devices

研究代表者

劉 小晰 (Liu, Xiaoxi)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：10372509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまで培ってきた磁性薄膜技術及び微細加工技術を基にして、フレキシブル基板上に、周囲環境の微小なエネルギーを高効率に収集できるMicro Electro Mechanical Systems (MEMS) 技術を確立した。機械振動からエネルギー収集の素子の開発に成功した。ここでは、磁性細線の横方向に誘導磁気異方性を付与することによって、応力によって磁区回転できることを明らかにした。フレキシブル基板の使用並びに磁性多層膜の使用が本研究の特徴である。磁区回転、或は磁壁の移動による空間磁束密度の変化がマイクロコイルによって電磁変換が実現した。新たなIoTデバイスの電力源と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現有のIoTデバイスを駆動するための肝心の電源に関しては、従来の延長線上にある「高性能化学電池」に関する研究が主流である。一方では、半導体技術の進歩により各種センサー、CPU、Wi-Fiなどではクロックの高周波数化ならびに駆動電力が数mW以下となる省エネルギー化が進行中である。それ故、深刻な環境問題を鑑みた場合、化学電池に比して環境に優しく長寿命で低コスト、高効率超小型のIoTシステムの駆動電力源の開発が重要である。本研究では、騒音などから超小型のIoTシステムの駆動電力源を実現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have successfully fabricated micro electron mechanical systems that show power generation from mechanical vibrations in purely ferromagnetic structures. These results are achieved by showing that the domain walls can be moved entirely by stress in a trilayer stack of ferromagnetic microwires. The use of flexible substrates with low Young's modulus and a trilayer magnetic stack enables the achievement of significant magnetization rotation or domain wall motion even from ambient vibrations. Here, the rotation of magnetization or domain wall motion is exploited to induce voltages in the pickup coils. The results shown here provide an alternative way to power IoT devices.

研究分野：磁気と磁性材料

キーワード：エネルギー収集 スピントロニクス 磁性材料

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

Internet of Things (IoT)は機械類、知能端末類などの"もの"に対して各種の信号情報のセンサー、情報演算処理のためのマイクロチップ並びにソフト、さらには情報通信のワイヤレスプロトコルを組み込み、"もの"間でのデータの収集、処理、制御を実現し、快適で安心・安全な社会の実現を目指すものである。すなわち、工業、インフラ、物流、住居、健康などをそれぞれ知能化させ、効率的でかつ快適な社会構築を目的とするものであり、第4次産業革命の牽引を期待されている。

このようなユビキタス IoT 社会を実現するためには、知能センサー、マイクロチップ、さらにワイヤレスプロトコル等組み込み情報デバイスが必要になる。しかしながら、これらの各種デバイスを駆動するための肝心要の電源に関しては、従来の延長線上にある「高性能化学電池」に関する研究が主流である。一方では、半導体技術の進歩により各種センサー、CPU、Wi-Fi などではクロックの高周波数化ならびに駆動電力が数 mW 以下となる省エネルギー化が進行中である。それ故、深刻な環境問題を鑑みた場合、化学電池に比して環境に優しく長寿命で低コスト、高効率超小型の IoT システムの駆動電力源の開発が重要な課題となる。

私たちの身の周りには、使われずに捨てられているわずかな熱、光、振動、電磁波エネルギーが無限に存在する。これらのいわゆる環境エネルギーを効率良く収集し電力に変換できれば、IoT 組み込みデバイスに対して環境に優しい、永久的な電力源とすることができる。

2. 研究の目的

本研究は、ウェアラブル端末自身の振動を電圧変換しデバイス駆動用電源として活用するためのものである。本研究では、図1に示す磁気 MEMS に着目している。この磁気 MEMS の特徴は、1. 高効率な MEMS は周囲環境のエネルギー及び生体振動（動き、音、心拍）エネルギーを収集し、電力に変換する。2. 磁気 MEMS の出力電力は、① GPS、加速度計、心拍計等の各種センサーを駆動し、② センサー情報の演算処理ならびにデータのワイヤレス通信のための駆動電力を提供する。すなわち、本研究はウェアラブルデバイスのための駆動用電池を不要とする自立電源 MEMS の実現を目的とするものである。そして、各種センサーを搭載したシリコン基板上で形成される高信頼性そして環境に優しい System-on-a-chip (SoC) の実現が本研究の目的である。

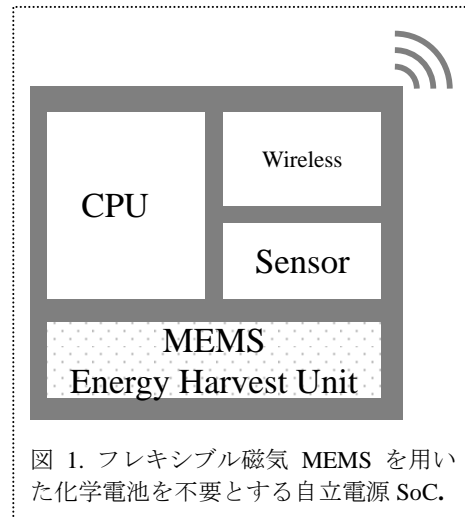


図1. フレキシブル磁気 MEMS を用いた化学電池を不要とする自立電源 SoC.

3. 研究の方法

本研究は材料選択、電磁変換シミュレーション、薄膜堆積、ナノリソグラフィ、デバイス集積等種々のプロセスを含む。

① 磁歪の薄膜構造・組成の依存性に関する検討

本研究 MEMS の大きな特徴は膜厚数 10 nm の FeCo 薄膜にある。このような超薄膜では、膜素子の磁気特性、特に本研究の目的と直接関連する磁歪定数や保磁力は下地層およびキャップ層に依存する。磁歪測定では、レーザー反射変位による光楕子式が一般的であるが、本研究のマイクロメートルオーダーの MEMS の測定ではほぼ不可能である。そこで本研究では、白色干渉顕微鏡を用いて、磁歪測定の手法を開発した。白色干渉顕微鏡では、薄膜の厚さ方向においてサブナノメートルの分解能を有するため、高感度 (ppm) で MEMS 素子の磁歪測定が可能になる。ここでは、狭小の顕微鏡試料台に乗せる磁歪評価治具として超小型・高磁界電磁石を自作した。磁歪の大きさは結晶方位に強く依存する、より効率的な MEMS 素子を作製するために、薄膜の結晶配向制御が重要な課題となる。本研究では、Ta, W, Ti, Pd, V, Al, Cu, Co, FeNi, CoNi など多数の下地層が結晶配向、微細構造へ与える影響を明らかにした。更に白色干渉顕微鏡磁歪測定システムを用いて、これらの下地層の磁歪への影響を明らかにした。

② MEMS 素子形状、サイズに関する検討

本研究の基本原理は応力による磁化回転及び磁壁移動である。これによる表面磁束の変化をファラデーの電磁誘導の法則を用いて電圧を得る。磁性薄膜素子の磁区構造は材料特性に依存すると共に、薄膜素子の形状、サイズにも依存する。ここでは、マイクロマグネティクスシミュレーションに基づき、リソグラフィで様々な形状の薄膜素子を加工し、その磁気特性をマイクロ顕微鏡を用いて調べた。磁化回転及び磁壁移動に関して、研究室の現有設備のカー顕微鏡を用いて、観

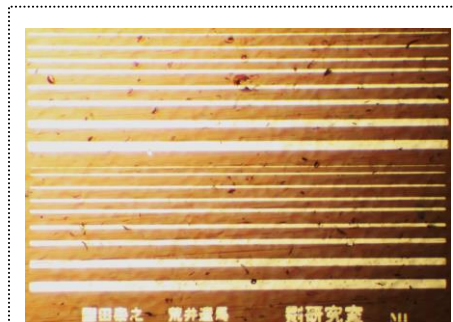


図2. フレキシブル基板上形成した磁性細線。

察した。そして、素子形状、サイズの影響を明らかにした。

③フレキシブル基板上的の薄膜素子の加工及びナノコイルの形成の検討

本研究のコイルのメリットは電磁変換の効率は極めて高く、集積しやすい、フレキシブル基板に対応できる。一方、ナノコイルは3次元的な構造を有するために、微細加工の難しい多層露光が必要になる。ここでは研究室の現有設備のマスクレス露光装置を用いて、赤色のライトでアライメントしてから、紫外線で露光した。精度を保った多層露光を可能にした。更に、本研究の走査レーザー熱処理装置を用いて、磁性薄膜の局所磁気異方性の制御を試みた。図2に本研究でフレキシブル基板上形成した磁性細線の顕微鏡写真を示す。

④フレキシブル磁気 MEMS の試作とその出力評価

ここでは、前述のシミュレーション結果に基づく、フレキシブル磁気 MEMS を試作する。本提案の MEMS は、一つの MEMS 薄膜素子を $50\mu\text{m}$ 角内に収める。試作段階では、1 cm 角の基板に、共振周波数の異なる MEMS 薄膜素子 40,000 個を前記マスクレス露光装置を用いて試作する。共振周波数は各素子の長さ、コイルの長さで調整する予定である。現有のマスクレス露光装置による素子パターン形状は、1 cm 角の面積での露光では約4分間と短時間で行うことができる。

前述のように、磁心材料は各種磁性合金中で最も飽和磁束密度の高い FeCo 合金を用いる。コイル及び電極は Ni/Cu 多層膜を採用する。Ni/Cu 多層膜は、Cu 単層膜より結晶粒子が約十分の1以下で、電気抵抗率は単層膜の約2倍であるが、機械的な特性(特にフレキシブル性)や耐食性が大きく改善されるという結果がこれまでの予備試験で明らかになっている。

出力評価に関して、音量一定 (60 dB) のスピーカーの周波数を変化させ、入力インピーダンス 50Ω のオシロスコープを用いて、周波数特性、出力特性を評価する。ここでは、汎用の PC があれば、フリーの評価用ソフトウェアを用いて出力の評価を行った。

4. 研究成果

① 薄膜の特性

研究期間中に、Ta, W, Ti, Pd, V, Al, Cu, Co, FeNi, CoNi など多数の下地層を用いて、厚さ約 100 nm の FeCo 薄膜を堆積した。ここでは、各下地層の厚さは 2nm とした。図3に CoNi 下地層を用いた場合の薄膜 X-線回折結果を示す。FeCo 層の結晶配向は下地層に制御することを明らかにした。

図4に各下地層を用いた FeCo 薄膜の表面走査電子顕微鏡の写真を示す。単層の FeCo 薄膜、Ti 下地層を用いた FeCo 薄膜は約 100 nm の針状粒子と観察された。一方、CoNi 下地層を用いた FeCo 薄膜は、直径約 10 以下の丸い粒子が観察された。

図5に FeCo 薄膜の面内磁化曲線を示す。単層の FeCo 薄膜は等方的な面内磁気異方性を示す。一方、CoNi 下地層を用いた FeCo 薄膜は面内磁気異方性を示す。これは、本研究で採用された対向ターゲット式スパッタリング装置の特徴と考えられる。磁化容易軸は二つのターゲットの対向方向と明らかにした。

② フレキシブル基板上で形成した磁性細線の磁気特性及びその応力による影響

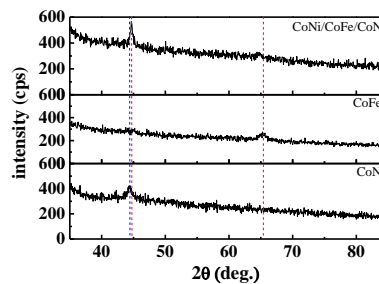


図3. FeCo 薄膜の下地層依存性。

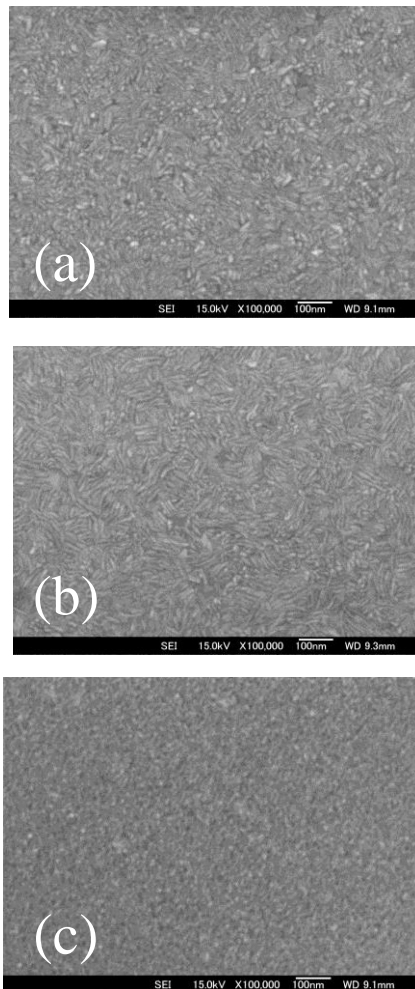


図4. FeCo 薄膜表面 SEM 写真。(a), FeCo 単層膜 ; (b), FeCo(100nm)/Ti(2nm), (c), FeCo(100nm)/CoNi(2nm).

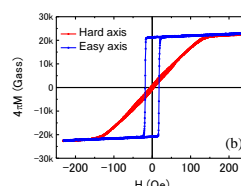
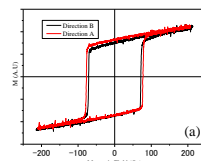


図5. FeCo 薄膜の磁化曲線。(a), FeCo 単層膜 ; (b), FeCo(100nm)/CoNi(2nm).

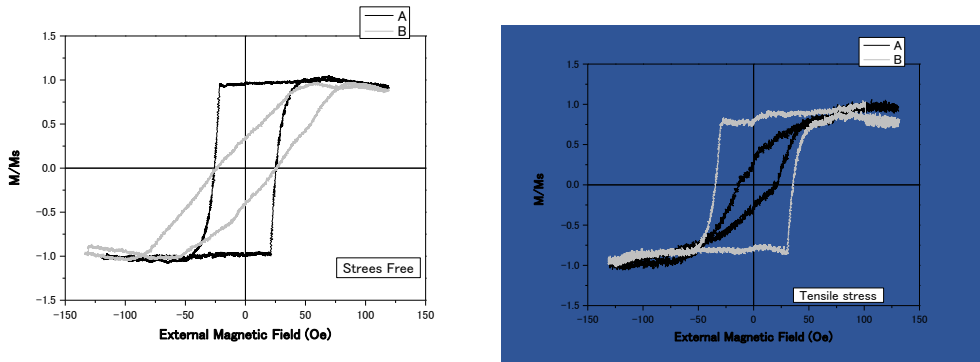


図 6. フレキシブル基板上形成した磁性細線の磁化曲線。

図 6 に磁性細線の長手方向、横方向の磁化曲線を示す。この磁化曲線は研究室で開発したマイクロプローブ装置を用いて測定した。この装置は、レーザーを $1\mu\text{m}$ 以下に集光し、反射光に偏光面の回転の分析をできる。実験では、厚さ 0.5nm 以下の薄膜の磁気特性の評価をできる。図 6 に示すように、応力フリーの状態では、磁性細線の横方向が磁化容易軸である。尚、引っ張り応力の場合、磁化容易軸が回転し、磁性細線の長手方向が磁化容易軸になったことを明らかにした。

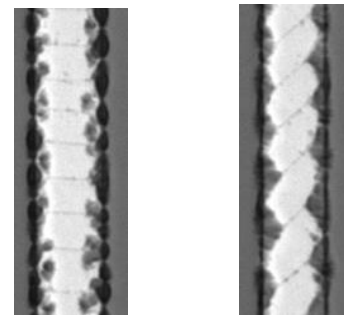


図 7. フレキシブル基板上の粉末図形法による磁性細線の磁区構造。

図 7 にフレキシブル基板の粉末図形法による磁性細線の磁区構造を示す。左側が応力フリーの状態、右側は応力添加時の磁区構造を示す。この結果から、磁性細線中に応力を加えることで、磁化容易軸がほぼ連続的に回転することが明らかになった。

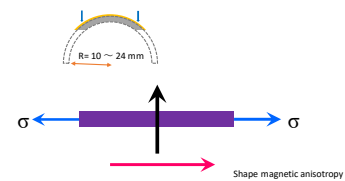


図 8. 磁性細線の形状磁気異方性 Vs 誘導磁気異方性。

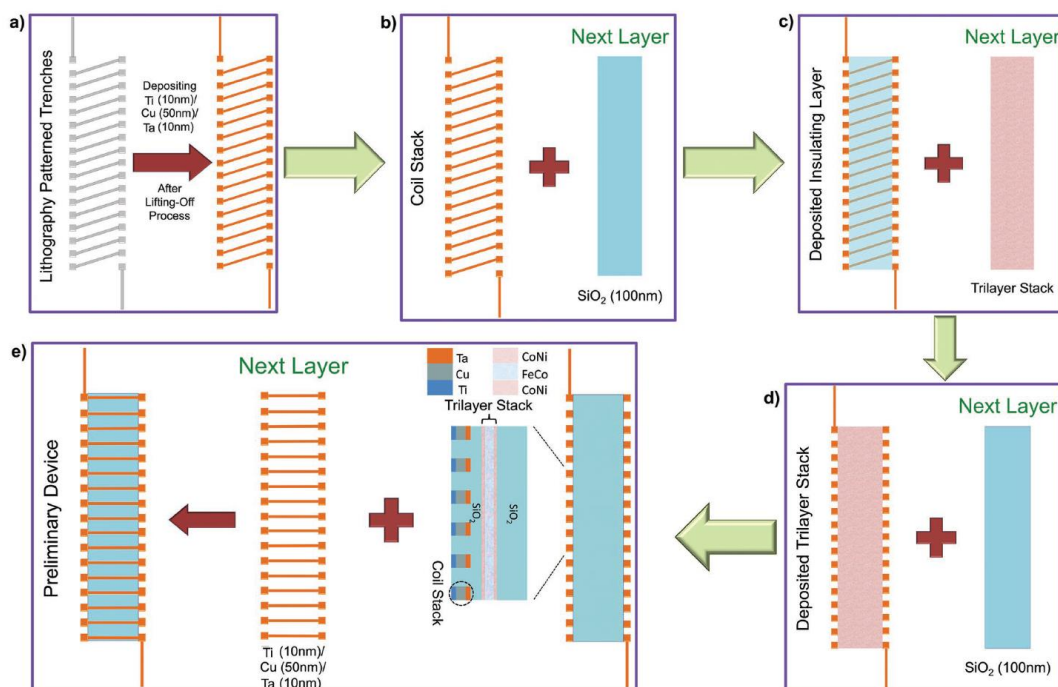


図 9. フレキシブル基板上振動エネルギーハーベスターの形成。

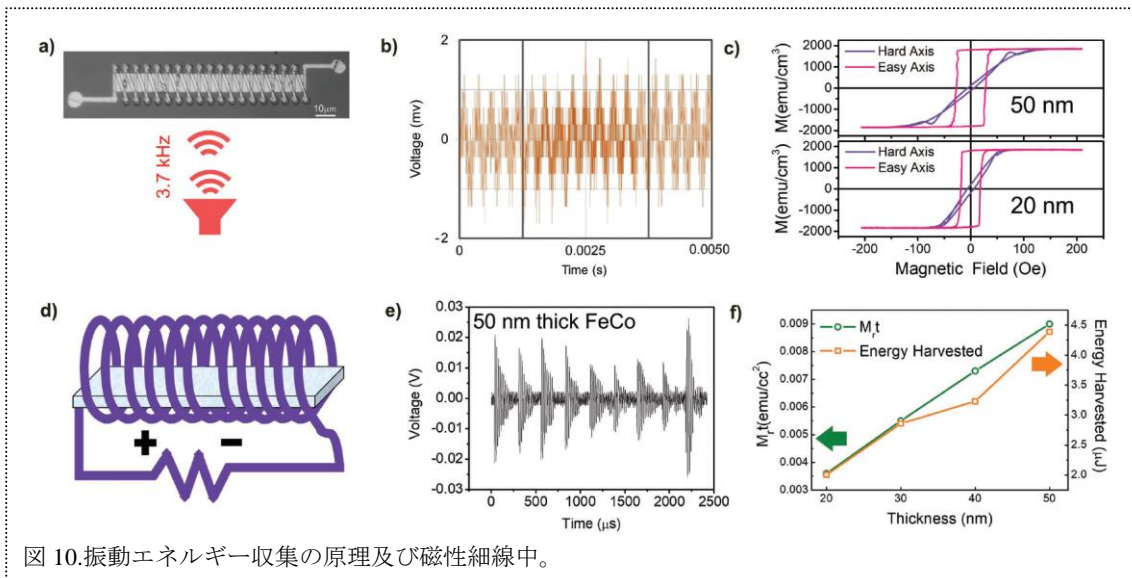


図 10. 振動エネルギー収集の原理及び磁性細線中。

図 7 の結果は図 8 に示すように説明できる。磁性細線では、形状磁気異方性の影響で、磁化容易磁区は長手方向に向く性質がある。一方、本研究では、対向ターゲット式スパッタリングの斜め入射の原因で、細線の横方向に誘導磁気異方性を付与した。この誘導磁気異方性が形状磁気異方性より高いため、応力フリーの状態で、図 7 に示すように、細線の横方向が磁化容易軸になった。一方、磁性細線に応力を受ける場合は、原子の結晶ひずみによって、細線横方向誘導磁気異方性が変動する。細線長手方向の形状磁気異方性との比較で、結果的に図 7 に示すように、応力によって磁化容易軸が回転することになった。

図 9 に磁性細線を用いた振動エネルギーハーベスターの作製手順を示す。

図 10 に本研究で形成したエネルギーハーベスターの素子写真、動作結果並びに磁性細線の磁性薄膜の厚さの影響を示す。ここでは、オシロスコープに 50 Ω の抵抗を繋げて測定した。本研究のエネルギーハーベスター（面積 1mm²）の出力は約 10⁻⁷W であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① Realization of Energy Harvesting Based on Stress-Induced Modification of Magnetic Domain Structures in Microwires, Sabpreet Bhatti, Chuang Ma, Xiaoxi Liu, SN Piramanayagam, IEEE Transactions on Magnetics (Early Access), pp. 1-7, 18 April 2019, DOI: 10.1109/TMAG.2019.2902569. (査読有)
- ② Stress-Induced Domain Wall Motion in FeCo-Based Magnetic Microwires for Realization of Energy Harvesting, Sabpreet Bhatti, Chuang Ma, Xiaoxi Liu, SN Piramanayagam, Adv. Electron. Mater. 2018, 1800467, pp.1-8, DOI: 10.1002/aelm.201800467. (査読有)

〔学会発表〕（計 0 件）

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：発電素子およびセンサ

発明者：劉 小晰

権利者：信州大学

種類：特許

番号：特願 2019-056344

出願年：2019

国内外の別：国内

○取得状況（計 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※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、研究者個人に帰属されます。