

令和元年6月17日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06308

研究課題名(和文) MEMS構造体と磁性薄膜の融合による高効率電磁型環境発電デバイス

研究課題名(英文) High-efficiency electromagnetic energy harvester by using MEMS structure with NdFeB thin film.

研究代表者

藤田 孝之 (Fujita, Takayuki)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50336830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギーハーベスティング技術を用いた振動型エネルギーハーベスタは、環境から得られる振動を電気エネルギーに変換する微小な発電機である。本研究では、微小な機械システムであるMEMS構造とネオジウム(NdFeB)磁石の融合により、発電効率の高いデバイス実現を目指した。発電効率向上には磁性体と対向したコイル電極の隙間を極小にする必要がある。本研究では、磁性膜によって構造体が歪むことを最小限に抑えるため、歪みを打ち消す構造を考案し、また初期的な実験結果から大幅に発電効率が向上することを解析的に証明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に磁性体をMEMS技術と組み合わせることは困難なため、本研究の技術は他に類を見ないものであり、他の原理で発電を行うエネルギーハーベスタに対して、低出力インピーダンス(電流がたくさん取り出せる)などの利点を持っている。残念ながら最終的なデバイスの完成には至らなかったが、本研究で得られた基礎実験の成果である磁性体の応力緩和構造は、国内外の学会、シンポジウム等で広く発表しており、日本のみならず世界の研究者への磁性膜プラスMEMSの研究の可能性を発信することができた。

研究成果の概要(英文)：Vibration type energy harvester using electromagnetic mechanism is a small generator which converts vibration obtained from environment into electric energy. In this study, the device realization with high power generation efficiency was aimed at by the fusion of MEMS structure and NdFeB magnet. In order to improve the power generation efficiency, it is necessary to minimize the gap between the coil electrode and the magnetic material. In this study, to minimize the distortion of the structure by the magnetic film, the structure which compensates the distortion was established, and it was proven analytically that the power generation efficiency drastically improved from the initial experimental result.

研究分野：MEMS

キーワード：エネルギーハーベスタ MEMS 磁性薄膜 NdFeB

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

IoT 社会の中核をなす自律型センサネットワークでは、ビルや橋梁などインフラ検査や、TPMS (タイヤ空気圧モニタシステム)をはじめとする自動車応用、個人の健康管理や幼児・老人の見守りまで、無数のセンサが意識することなく稼働する社会を目指した超分散型システムが推進されている。センサやマイクロプロセッサ、無線デバイスの極省電力化が進む一方、エネルギー供給源としては旧来の小型電池に頼っており、使用済電池廃棄による環境への影響が懸念される。このため完全自給自足の電源としての環境発電デバイス(エナジーハーベスタ)が盛んに研究されている。

エナジーハーベスタは種々の方法が提案されているが、なかでも振動型は他方式に比べて適用可能なエネルギーの範囲が広く、学会等でも発表件数が最も多い研究分野である。環境振動から効率よくエネルギーを取り出すため、対象となる振動の周波数に共振点をあわせた高い機械的Q値の共振構造を設計するのが一般的であったが、対象周波数の多様化や、僅かな共振ずれで十分な電力が得られなくなるため、近年はインパルス衝撃による減衰振動発電が主流になりつつある。

振動型エナジーハーベスタには方式別に静電型、圧電型、電磁型がある。静電型は静電誘導による発電で、1000V以上で高圧荷電された絶縁体(エレクトレット)を電荷源として用いるため出力電圧は極めて高いが、原理的にエアギャップ(空気キャパシタ)の変化が出力を担うため、出力インピーダンスも極めて高い。このため電圧として発電状況の確認は容易であるが、実際に電源として使用するには容量増強のための大型化、狭ギャップ化が必要となり、これに伴う静電型特有のプルイン現象の回避が大きな課題である。近年、エアギャップ内に高誘電率のイオン液体を封入する試みもなされている。また、PZTをはじめとする圧電型は、発生電圧、出力インピーダンスともに扱いやすい値で、非常に多くの研究例が報告されているが、発電には圧電材料自身に応力を加える必要があり耐久性が問題となる。一方、電磁型は出力インピーダンスが誘導コイルの抵抗とほぼ等価であり、極めて低くできる利点を持つ。しかしながら磁石とMEMS構造の組み合わせは実例が少なく、またロータ・ステータ構造をもつ回転デバイスと異なり、振動型デバイスで磁石とコイルを高速に相対運動させることは難しく、十分な誘導起電力(発電量)を得ることは事実上不可能であった。

2. 研究の目的

IoT (Internet of Things) 社会に向けた、電力を完全に自給自足する省エネ技術のための振動型環境発電デバイス(エナジーハーベスタ)を飛躍的に高効率化する手法を提案する。超小型振動発電の研究はほとんどが圧電型もしくは静電型であるが、材料の疲労や、極めて高い出力インピーダンスと静電引力によるプルイン現象が高性能化の妨げとなっている。そこで、薄膜磁石とシリコン微小構造体(MEMS)を融合した電磁型振動エナジーハーベスタを提案し、その最適設計手法を確立する。電磁型の特徴である超低出力インピーダンスかつ信頼性の高い高効率発電デバイスを実現する。本研究では凹凸シリコン微細構造体上へ形成されたNdFeB/Ta多層スパッタ膜と、金めっき蛇行コイルを極狭ギャップで組み合わせた面内方向振動の発電デバイスを実現する。

3. 研究の方法

電磁界シミュレーションによる磁束分布、ばね-マス系とVDRGモデルから検証した電磁型エナジーハーベスタの設計手法を確立し、極狭ギャップを有する高効率エナジーハーベスタを実現する。狭ギャップ化の妨げとなる磁性膜付シリコンウエハの残留応力による反りを極小化するため、応力を打ち消すウエハ裏面への補正膜成膜プロセスを最適化する。また磁性体パターンの増大は、応力増加と反磁界により磁束密度低下を引き起こすことから、微細分割についての試作・評価結果から形状の最適化をする。実測値・シミュレーションの比較からモデルの妥当性を検証し最適設計をおこなう。まず磁性体が片面パターン構造で試作・評価を行い、その結果をもとに両面磁性体パターンモデルに移る。

(1)発電波形解析と実測値の評価

電磁界シミュレーションで、先行研究を模したシリコン凹凸とスパッタNdFeB膜厚を入力し、Gap距離分離れた蛇行コイル位置での磁束分布を算出している。蛇行コイルは往復の電流が打ち消さないよう、磁石ピッチPの半分で折り返す構造とする。最適負荷接続時に取り出される電流値からローレンツ力を算出し、ばね-マス系の運動方程式にフィードバックすることで解析波形を得ている。実測値と非常によく一致しているが、より微細化された場合にも一致するか、ローレンツ力の影響が大きくなった場合など、様々な寸法比について試作検証を行い、モデル化の精度を高める。

(2)高分解能ホール素子、表面磁束分布評価

磁気ストライプパターン計測は、解析結果との比較のために重要であるが、微細になるほど計測が困難になる。ここでは市販ホール素子の樹脂パッケージを極限まで薄くすることで、検出部との距離を近づけ高分解能で計測を行い、この知見を電磁界シミュレータとの比較検証に活用する。また得られた値から垂直面に堆積された磁性膜の影響についても明らかにする。

(3)NdFeB スパッタ条件の最適化

(1)に関する予備実験結果から、磁気ストライプのピッチとギャップを同時に微細化していけば、振動型構造であっても磁束変化の相対速度が向上し発電量が劇的に向上する。しかしながらスパッタ NdFeB 膜は高い磁気特性を得るために 500°C以上の高温成膜が必須であることから高い残留応力をしめす。低温成膜で応力が低減できることは先行研究で確認しているが、磁気特性は著しく低下する。このため試験的にウエハ裏面より応力補正用膜を成膜すること比較的平坦な膜を得ている。極狭ギャップ構造実現のため、さらなる平坦化を補正膜成膜の最中に真空中で白色光観察を行うなどして in-situ 平坦化に取り組む。

応力緩和による平坦化で狭ギャップ化を実現した後、磁気ストライプのピッチ短縮には新たな課題が存在する。磁性膜は水平面のみならず垂直壁面にも堆積するため、ピッチ短縮にとともに、溝構造が埋まることで磁気ストライプパターンが十分得られない恐れがある。このため、スパッタ圧力、DC バイアスの条件変更により直進性が高く壁面に堆積しないスパッタ条件を確立する。

(4)ローレンツ力を考慮した電気的および機械的減衰定数マッチング

狭ギャップ化にともなって上昇した電気的減衰定数 c_e に合わせ、真空パッケージで機械的 Q 値を上昇（機械的減衰 c_m を低減）した場合の、発電電力と合成 Q 値のグラフである。VDRG モデル通り、ギャップが縮まるとローレンツ力 (c_m) が上昇し、合成 Q 値が低下していく。 c_m と c_e が一致したとき、すなわち合成 Q 値が機械的 Q 値の半分となるギャップが最大発電電力点となる。最適負荷抵抗接続時の電力は、印加された外部エネルギーの 50% × 50% で効率の理論限界合計 25% の約 1 μ W が得られる。先行研究の 30 μ m 時の 8 nW に比べ、真空パッケージなどで機械的 Q 値を 1000 まで向上させ、エアギャップを 7 μ m まで短縮できれば、3 桁以上の発電量向上が期待される。

(5)反磁界低減構造

薄膜磁性体はアスペクトが低く、面積が大きくなるほど反磁界の影響で周辺部以外の磁束密度が著しく減少する。現状は非常に細長い短冊パターンの磁性体であるため、直交方向にさらに溝構造を作製することで反磁界を低減させる。複数パターンの試作と解析の比較で最適値も明らかにする。

(6)両面对称構造による平坦化と高効率化

応力補正について、積極的に裏面にも対称構造の凹凸を作製し、補正膜として NdFeB 膜を用いれば、中央に振動 NdFeB 膜付きマスを上下から蛇行コイルで挟んだ構造が考えられ、単位体積あたりの発電量が倍増する。パッチ作製プロセスも含め、実現していく。

4. 研究成果

本研究課題では、MEMS 技術で作製した微小なシリコン構造体上に、スパッタ成膜した NdFeB 磁性薄膜を用いた電磁型エナジーハーベスタの研究を推進してきた。

まず、電磁界シミュレーションによる VDRG モデルから検証した電磁型エナジーハーベスタの設計手法の確立では、電磁界シミュレーションで、先行研究を模したシリコン凹凸とスパッタ NdFeB 膜厚を入力し、蛇行コイル位置での磁束分布を算出することで理論的な発電電力を求める手法を確立した。次に、極狭ギャップを有する高効率エナジーハーベスタを実現のための高性能ホール素子、表面磁束分布計測では、VDRG モデルから最適な磁石ピッチと、発電時に発生するローレンツ力を有限要素解析ソフト (ANSYS) で計算し、100 Hz、3 μ m_{p-p} の正弦振動を与えれば、従来の 43 倍の 0.42 μ W の電力が得られることを解析的に確認した。実測との比較によって提案解析モデルの実効性を検証する予定であったが、装置トラブルのため確認には至らなかった。狭ギャップ化の妨げとなる磁性膜付シリコンウエハの残留応力による反りを極小化するための応力補正膜成膜プロセス最適化については、シリコンの両面にコルゲート構造(凹凸形状)を形成し、その表面に NdFeB 磁性膜を両面对称に成膜することでシリコン構造体の反りを低減するため、試験サンプルに磁性体を成膜し白色表面形状計で評価した結果、曲率半径を 5 m から 40 m に向上させることができた。この結果よりエアギャップを 30 μ m から 2 μ m まで低減できると仮定し、シミュレーションにより発電電力を 190 倍の 48 μ W にできることを確認できた。シミュレーション結果を実験的に確認するため、考案した両面プロセスを用いて最終的な発電デバイスの作製に取り組んだが、エアギャップ規定に使用していたポジ型厚膜レジスト材料が廃番となったため、新規材料での最適化条件の導出に時間を費やしてしまった。また、使用している MEMS 用クリーンルーム施設の建屋引っ越し時期と重なったため、必要な実験装置が使用できなかったこともあり完成には至らなかった。

派生研究として取り組んだ、コルゲート構造によって反磁界を低減した磁気反発構造と、静電エレクトレット型エナジーハーベスタを組み合わせた構造では、スリット形状のシリコン MEMS 構造体を提案、試作し、磁気反発力の初期評価を行った。重力方向に磁気反発力が発生するジグと、精密電子秤の組み合わせで、定量的な磁気反発力計測が行えた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Yamamoto K., Fujita T., Badel A., Formosa F., Kanda K., Maenaka K.

Energy Estimation for Electret Harvester with Nonlinear Spring

Proceedings , 585 ~ 585 , 2017

DOI: 10.3390/proceedings1040585

吉井 真一、山口 晃平、藤田 孝之、神田 健介、前中 一介

静電型エネルギーハーベスタのための NdFeB 薄膜磁石を用いたギャップ制御機構

電気学会論文誌. E, センサ・マイクロマシン部門誌

229 ~ 233, 2017

DOI: 10.1541/ieejsmas.137.229

〔学会発表〕(計 12 件)

T. Fujita , MEMS technology for energy harvesting , Japanese French Week on Mechatronics, Annecy, France, 2018 (招待講演)(国際学会) , 2018

T. Fujita , MEMS Technology for Vibration Energy Harvesters , International conference on BioSensors, BioElectronics, BioMedical Devices, BioMEMS/NEMS & Applications (Bio4Apps), Harbin, China (招待講演)(国際学会) , 2018

H. Uchida, T. Fujita, K. Kanda, K. Maenaka , Electrostatic Energy Harvester with Double Sided Electrodes for Force Reduction , Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT2018), (Hong Kong, June, 24-27, 2018) (国際学会) , 2018

福永彬人, 吉井真一, 神田健介, 藤田孝之, 前中一介, 面外振動静電型エネルギーハーベスタのための NdFeB 薄膜磁石を用いたプルイン防止構造における磁気反発力計測, 第 35 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2018

福永 彬人, 吉井 真一, 神田 健介, 藤田 孝之, 前中 一介, TPMS を指向した面外振動型エネルギーハーベスタへの NdFeB 薄膜磁石の応用, 第 34 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2017

吉井 真一, 北川 雄基, 藤田 孝之, 神田 健介, 前中 一介, 振動型エネルギーハーベスタのための磁気反発力を用いた耐衝撃構造, 第 34 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2017

T. Fujita , Micro Energy Harvester for Human Sensing System , International Symposium on Multidisciplinary Engineering (ISMDE2016), Dhakka, Bangladesh (招待講演)(国際学会) , 2016

T. Fujita, MEMS Based Energy Harvester for IoT World, International conference on informatics, electronics & vision (ICIEV2016), Dhakka, Bangladesh (招待講演)(国際学会) , 2016

T. Fujita, K. Yamaguchi, S. Yoshii, K. Kanda, K. Maenaka, Design and Optimization of a MEMS Based Electromagnetic Vibration Energy Using Sputtered NdFeB Film, European Materials Research Society, 2016 Spring (国際学会) , 2016

S. Yoshii, K. Yamaguchi, T. Fujita, K. Kanda, K. Maenaka, Pull-in Prevention Method Using NdFeB Thin-Film Magnet for Electrostatic Energy Harvester, Asia Pacific Conf. Transducers (APCOT2016), Kanazawa, Japan (国際学会) , 2016

S. Yoshii, K. Yamaguchi, T. Fujita, K. Kanda, and K. Maenaka, Collision-free structure using thin-film magnet for electrostatic energy harvester, PowerMEMS2016 (国際学会) , Paris, France, 2016

吉井真一, 山口晃平, 藤田孝之, 神田健介, 前中一介, 静電型エネルギーハーベスタのための NdFeB 薄膜磁石を用いた磁気ストッパー構造, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：藤田 孝之

ローマ字氏名：(FUJITA, Takayuki)

所属研究機関名：兵庫県立大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁): 50336830

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。