

	あさぬま はるひこ
氏名	浅沼春彦
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成27年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) ナノメカニクス専攻
学位論文題目	Study of Electrostatic-induced Energy Harvester Using Ferroelectric Dipole Electret
指導教員	東北大学教授 桑野 博喜
論文審査委員	主査 東北大学教授 桑野 博喜 東北大学教授 羽根 一博 東北大学教授 小野 崇人 東北大学教授 田中 秀治 東北大学准教授 原 基揚

論文内容要旨

Recently, there is growing interest in autonomous wireless sensor networks aiming at automated health monitoring of vehicles, facilities, buildings, infrastructures, and humans. One of the key issues is to develop a maintenance-free power source for operating sensor nodes composing the autonomous wireless sensor networks. An electrostatic vibration energy harvester using a charged dielectric termed "electret" is being recognized as a promising solution since it can convert low-level mechanical vibration available in ambient environment (typical frequency and acceleration are below 200 Hz and 9.8 m/s^2 , respectively) into electricity. However, its output power still remains low, compared to other transduction such as electromagnetic or piezoelectric. Furthermore, as well as higher output power, vibration energy harvesters desperately require wider operational frequency band in order to scavenge energy even when the peak frequency of ambient vibration moves out of their resonance frequency. Main theme of this work is to develop a high performance electret-based out-of-plane vibration energy harvester with high output power as well as wide frequency band.

To significantly enhance output power of electrostatic vibration energy harvester above that obtained from conventional polymer- or silicon-based electrets, this study proposes an electret utilizing dipole orientation of ferroelectric material, termed ferroelectric dipole electrets (FDEs), and establishes a method of extracting substantial electric field outside the FDE. After poling treatment, a poled ferroelectric material function as an FDE, by removing the electrodes and thus the electric double layers formed at the interface between the electrodes and the poled ferroelectric material. Then, I theoretically investigated net electric field outside the FDE using a parallel plate capacitor model, and revealed that the net electric field outside the FDE enhances not only higher surface charge density but also greater thickness of the FDE. According to the theoretical prediction, the resulting output powers of FDE-based out-of-plane vibration energy harvester were enhanced with increasing the surface charge density and thickness of the FDEs. The output power density for the FDE developed in this study was $78 \mu\text{W}/\text{cm}^3$, a

three-fold increase over a conventional polymer electret. I expect that FDE would accomplish further enhancement in output power if we could establish a way of improving incomplete polarization of the FDE due to currently-employed poor electrical contact between the PZT ceramic and the copper foil tape electrode.

The newly-developed electret termed FDE exhibited instability of surface potential, whereas it can afford significant enhancement in output power. This study proposes two possible mechanisms of the surface potential instability of the FDEs, "the depoling" and "the space charge screening," and determined which of the mechanisms triggers the instability of the FDE. The FDEs were prepared from hard type PZT ceramics against the depoling and from PMN-PT single crystal against the space charge screening. This study found in experiment that the origin of the instability of FDE is attributed to the depoling not the space charge screening, and the FDE formed from hard type PZT ceramic exhibits longer surface potential stability as well as higher output power, compared to the other FDEs formed from soft type or from single crystalline ferroelectrics. Moreover, the hard FDE at higher level of polarization by applying higher poling voltage showed longer stability. Therefore, the hard type ferroelectric material and the enhancement in its polarization level are promising for extending life time of FDEs.

To further enhance output power of an FDE-based out-of-plane vibration energy harvester, we also need to develop a robust oscillator that can travel without fracture under 0.1-1 mm displacement. Under such large displacement, a silicon-based oscillator widely employed in MEMS sensors is not appropriate in terms of mechanical reliability, even with the advantage of high-precision processing. We should find an alternative material with higher mechanical reliability as well as applicability to high-precision processing. As a promising material for such an oscillator, this study proposes a fine-grained stainless steel film with the smaller grain size and the improvement of adhesion to photoresist. The oscillator fabricated from the fine-grained stainless steel showed smooth edges, less side-etched depth, and larger taper angles compared to the oscillator from typical stainless steel.

To achieve wider frequency band of an electret-based out-of-plane vibration energy harvester, I investigated the dependence of harvester's performance (output power, resonance frequency, and frequency band width) on the initial air gaps, both numerically and experimentally. With reducing the initial air gap, enhanced electrostatic-force induced soft spring effect, by which wider frequency band and lower resonance frequency are achieved, whereas output power has peak value at a certain initial air gap. Reducing the initial air gap is a promising scheme for wide frequency band in out-of-plane vibration energy harvester.

Finally, based on the results above described, I have developed a high performance electret-based out-of-plane vibration energy

harvester by combining the FDEs and the fine-grained stainless steel-based oscillator. In practical use, a strong attractive electrostatic force of the FDE can easily cause a pull-in effect, by which an oscillator snaps and sticks to the FDE. To prevent the pull-in, this study proposes a non-linear spring with stopper. The FEM analysis validated that the proposed non-linear spring can withstand the expected pull-in force of the FDE by increasing the spring constant after the contact with the stoppers. The FDE-based out-of-plane vibration energy harvester showed no pull-in, and maximum raw output power of 27 μW and frequency band width 19 Hz at applied acceleration 9.8 m/s^2 . The maximum output power for the FDE at applied acceleration 9.8 m/s^2 showed a 1.6-fold increase over the conventional polymer electret. In comparison to the state-of-the-art, the developed harvester achieved wide frequency band, as well as the highest normalized power density.

論文審査結果の要旨

MEMS (Micro Electromechanical Systems) はマイクロセンサやマイクロアクチュエータなどとして情報機器等に用いられ新しい装置やシステムを生み出す重要なデバイスである。特に近年は、MEMS技術と無線通信技術とを組み合わせたワイヤレスシステムの研究が盛んに行われておりここでは自立型電源の開発が最も重要な課題となっている。このようなマイクロシステムの電源として最も一般的な電池では廃棄物の環境負荷や交換作業の煩雑さが問題となっており環境振動からエネルギーを得る振動型エネルギーハーベスタがそれらの代替もしくは補間技術として注目を集めている。そのような背景を受け、本研究は、エレクトレットを利用した振動型エネルギーハーベスタの発電性能の向上を、材料学および構造学の観点から目指すものである。そのため本研究では発電量の増大に寄与する新規材料開発として、強誘電体チタン酸ジルコン酸塩(PZT)を世界で初めてエレクトレットに応用しその性能評価や発電機構の解明を行っている。また広い振動周波数帯域からの発電を可能とする構造開発として静電引力を利用した振動特性の制御を行っている。以上、全編7章から構成される。

第1章では序論として本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では世界で初となる、強誘電体エレクトレットの開発について述べている。初めに理論的な考察を行っており、従来のエレクトレット材料に比べて2桁程度大きな誘電率を持つ強誘電体を用いれば、エレクトレットの表面電荷密度を著しく増大できるため、ハーベスタの大幅な出力増大が見込めることを示している。また強誘電体の分極方向に材料の厚みを増すことで、効率良く表面電荷密度を利用できることを示している。実際のエレクトレット作製は、強誘電体の中でも極めて高い誘電率を持つ強誘電体に電界を印加して分極処理することで行っている。得られたエレクトレットは、従来型のエレクトレットよりも高いハーベスタ出力を実現しており、強誘電体の有効性を示唆した理論予想の妥当性を証明している。本章で得られる強誘電体エレクトレットの作製とその物性に関する知見は高出力ハーベスタ開発に寄与する重要な成果である。

第3章では強誘電体エレクトレットの分極が劣化する機構を調査している。その結果、分極反転のピニングサイトとなる酸素欠損がドメイン壁近傍に多数存在する試料において劣化が抑制されることから、分極反転が劣化の支配的要因であることを明らかにしておりこのことは長寿命材料探索の促進につながる有用な結果である。

第4章では高出力化に必要な大きな構造変位に耐えうる高耐久性材料の探索を行っている。

第5章と第6章では、強誘電体エレクトレットのような、極めて高い表面電荷密度を持つエレクトレットを応用したハーベスタにおいて顕在化する、エレクトレットと対向する電極間に生じる静電引力が、発電特性に与える影響について調査している。第5章では、エレクトレットと対向電極間距離を小さくするほど、静電引力により振動周波数の広帯域化が実現する一方で、電極の振動変位が制限され、ついにはエレクトレットに張り付いてしまうことから、目的に応じたギャップ最適化の必要性を明らかにしている。第6章では、適切なストッパー機構を設置することで、上記の張り付きを防止し、高表面電荷密度エレクトレットの性能を最大限に引き出せることを実証している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は強誘電体エレクトレット材料の開発に世界で初めて成功しさらに、このエレクトレットを用いた、高い出力と広い周波数帯域応答性を併せ持つ高性能エネルギーハーベスタの実現可能性を実証するものである。加えて本論文研究で得られた強誘電体エレクトレットの合成・設計・評価手法に関する知見は基礎的な材料開発から実用的なデバイス開発にいたる広範な領域で研究指針を提供するものでありナノメカニクスおよび情報ナノシステム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。