

(論文題目)

バイポーラ荷電を用いた静電式振動型エネルギーハーベスタに関する研究

(申請者) 園田晃司

1. 論文内容の要旨

本研究は、マイクロマシニング技術を用いた静電式振動型エネルギーハーベスタについて、新たな荷電手法と特性評価および SPICE 等価回路モデルの作成・実測との比較評価についてまとめたものであり、要旨は以下の通りである。

第 1 章は序論で、無線センサネットワークノードの概況についてふれ、電源を補助するために身の回りの環境からエネルギーを収集し電力に変換するエネルギーハーベスティング技術について目的、意義を明らかにした。

第 2 章では、静電式振動型エネルギーハーベスタの基本的な動作原理・特性について述べ、新たに提案するバイポーラ荷電手法の実験結果、デバイスの構造解析やマイクロマシニングによるバッチ作製プロセス、作製デバイスの発電特性や荷電手法による特性の比較・評価結果について示している。従来はエレクトレットをパターンニングすることで、荷電する領域のパターンを決めていたが、本研究ではあらかじめパターンニングした電極上にエレクトレットを成膜し、荷電時に電極電位を設定することで電極パターンどおりにエレクトレットが荷電される選択的荷電手法を考案し、実験・評価により特性を確認している。従来のモノポーラ荷電では正負いずれかの電荷が荷電されることに対し、提案するバイポーラ荷電手法では正負両方の電荷を同一のエレクトレット上に荷電する。バイポーラ荷電ではエレクトレットが正負両方の電位を持つため、モノポーラ荷電に対して表面電位差を単純に 2 倍に上昇させられる。発電力はエレクトレットの表面電位差が大きく影響するため、バイポーラ荷電は発電力の向上にも有用な手法であることを実験結果により示している。また、表面電位差が等しい場合においてバイポーラ荷電では電極間の電位差を半減できることから最大の静電気力を大きく軽減できる。これにより、バイポーラ荷電デバイスは発電力を等しく保ったまま、外部からの振動エネルギーが低い場合でも発電力を大きく得られることを見出し比較実験により確認している。デバイスはウエハレベルでのバッチ処理による作製が可能で 4 インチのウエハから $13 \times 12 \times 1.2 \text{ mm}^3$ のサイズで 23 個のデバイスを同時作製でき、最大の発電力は $\pm 250 \text{ V}$ 荷電、振動周波数 325 Hz、印加加速度 7 g、負荷抵抗値 $0.9 \text{ M}\Omega$ の条件下で $9.8 \mu\text{W}$ で、最大発電効率は印加加速度 1.4 g で 2.5%であった。

各種特性として負荷抵抗，印加加速度，荷電電位に対する発電力や荷電電位による共振周波数変化などをモノポーラ荷電とバイポーラ荷電デバイスのそれぞれで評価・比較した結果を示した。

第3章では，静電式振動型エネルギーハーベスタの SPICE 等価回路モデルについて述べ，SPICE モデルの構成，荷電電位，寄生容量，負荷抵抗などの条件による発電特性の変化や静電気力の影響について，解析結果だけでなくデバイスの実測結果との比較評価を交えて示している。SPICE モデルを確立すれば他の電子部品と同様に回路シミュレータ上で電気的特性を表現でき，任意の振動条件における発電出力を電力回収回路などと接続した際の動作解析が可能となり，ハーベスタを利用したシステム設計などにおいても有用性が高い。さらに，デバイスの電極間の位置関係による発電特性の変化などが解析でき，振動条件に最適なデバイス構造の解析などにも役立つ。本章では電極間の静電容量変化のみ FEM 解析により解析すれば，無償で入手可能な SPICE 回路シミュレータである LTspice を利用し作成した SPICE モデルで任意の振動条件における発電時のデバイスの出力電流や最大電力を出力する負荷抵抗値などを解析可能であることを示している。解析だけでなく実測との比較結果から確立した SPICE モデルがデバイス特性をよく表現していることを確認している。また，振動マスにどのような静電気力が働くか解析でき，実測による評価が困難な静電気力について外部からの振動エネルギーに対して静電気力でマスの振動が抑制される状態の解析結果についても示した。

第4章は結論であり，本研究により得られた主な成果を総括している。

2. 論文審査結果の要旨

近年，あらゆるものがセンサネットワークでつながる Trillion Sensors や IoT (Internet of Things) の急速な進歩にともない，自立型電源のひとつとしてエネルギーハーベスティング技術が注目されている。同技術では，光，熱，振動，電磁波などの環境に散在するエネルギーを電気エネルギーに変換し，メンテナンスフリーの自立電源実現を目指している。なかでも振動型エネルギーハーベスタ (Vibration Energy Harvester; VEH) は，MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を採用することで，量産性に優れ，小型化高機能化・低価格化が期待できるため多くの研究がなされている。しかしながら，これら研究の主眼は高性能なデバイス単体の作製に置かれており，電源としての性能仕様評価を含んだ設計手法は確立されていなかった。

本研究は，ウェアラブル MEMS デバイス用の電源として VEH を取り上げ，その中でも MEMS 化に適したエレクトレット静電式 VEH の高性能化とその設計手法を確立しようとするものである。エレクトレットは半永久的に帯電した絶縁材料で，静電誘導による電荷移動で発電を行う静電式 VEH のバイアス電圧源として働く。まず，エレクトレット荷電

方法では、従来から用いられているコロナ放電による荷電に、独自のバイアス電位可変技術を新たに考案することで、エレクトレット材料への微細加工無しに任意電位に荷電する技術を実現している。同技術により世界に類をみない正負両電荷を荷電したバイポーラ荷電エレクトレット作製法を確立した。新規手法であるバイポーラ荷電を行うことで、同電位差をもつ従来デバイスに比べ発電に必要な外部エネルギーを大幅に低減でき、低い振動レベルでも十分な発電力が得られることを解析的、実験的に明らかにしている。またデバイス構造設計においても、FEM 解析で得られた形状-キャパシタンスの関係から近似式を求め、任意形状・位置におけるキャパシタンス式導出法を考案した。同導出式および発電デバイスのバネ-マス運動方程式を電子回路シミュレータ (SPICE) に組み込むことで、任意外部振動に対する発電量、インピーダンス、静電印力などが容易に算出できるプログラム構築に成功した。本プログラムは MEMS 技術で試作されたデバイスとの比較により高精度で一致することが確認されている。同 SPICE シミュレータは誰でも無償入手可能であり、センサネットワークなど他分野の研究者にもエナジーハーベスタが容易に検証できる環境を構築した業績はきわめて大きいといえる。

以上のように本研究は学術的な寄与のみならず、新しい MEMS エナジーハーベスタの設計指針を与える点で工業的価値と貢献が非常に大きなものであるといえる。

よって本論文は博士 (工学) の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成 27 年 7 月 28 日、論文内容およびそれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

平成 27 年 8 月 19 日

主査 藤田 孝之 印

副査 前中 一介 印

副査 畠山 賢一 印

副査 奈良 安雄 印