



HAL
open science

Générateur électrostatique embarqué à électret parylène et polymère électro-actif

Clara Lagomarsini, Claire Jean-Mistral, Stephane Monfray, Alain Sylvestre

► To cite this version:

Clara Lagomarsini, Claire Jean-Mistral, Stephane Monfray, Alain Sylvestre. Générateur électrostatique embarqué à électret parylène et polymère électro-actif. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981870

HAL Id: hal-02981870

<https://hal.science/hal-02981870>

Submitted on 28 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Générateur électrostatique embarqué à électret parylène et polymère électro-actif

Clara LAGOMARSINI¹, Claire JEAN-MISTRAL², Stéphane MONFRAY³, Alain SYLVESTRE¹

1. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, Grenoble, France

2. Univ. Lyon, INSA Lyon, CNRS UMR 5259, LaMCoS, Villeurbanne, France

3. STMicroelectronics, 850, rue Jean Monnet, F-38926 Crolles, France

RESUME – Dans ce travail, nous présentons un prototype de générateur électrostatique souple pouvant être incorporé au niveau du genou pour produire de l'énergie lors de la marche ou de la course à pied. Ce générateur, complètement autonome, s'appuie sur l'incorporation d'un électret qui joue le rôle de réservoir de charges et d'un polymère électroactif de type silicone. L'originalité vient du matériau électret constitué d'un polymère de la famille des parylènes fluorés et de la géométrie du dispositif permettant à la fois d'optimiser les performances mécaniques et électriques de la structure.

Mots-clés— polymère électro-actif, générateur électrostatique, parylène, électret.

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, les capteurs embarqués ont gagné en précision, fiabilité et robustesse, tout en se miniaturisant et ils sont largement utilisés dans le domaine médical et sportif pour récolter toutes sortes de données physiologiques. Développer des générateurs d'énergie qui convertissent l'énergie mécanique ambiante en électricité constitue une voie très intéressante afin de rendre ces capteurs autonomes. Cette approche est d'autant plus réaliste que le développement de composants électroniques consommant des puissances plus faibles est maintenant une réalité. Par exemple, les systèmes microélectromécaniques (MEMS) consomment quelques microwatts et les MP3 ou GPS ne dépassent pas la centaine de milliwatt (Fig.1) [1].



Fig.1 : Puissances nécessaires des dispositifs à pile [1]

Concernant les applications envisagées dans la récupération d'énergie mécanique pour une conversion en énergie électrique, celles situées dans l'environnement direct ou indirect du corps humain méritent toute notre attention. Ces générateurs pourraient ainsi alimenter des capteurs mesurant des fonctions vitales comme la pression sanguine ou le rythme cardiaque ou encore le taux d'oxygène dans le sang. Ils peuvent également être judicieusement positionnés sur des vêtements ou le corps lors du mouvement de la personne. Les puissances disponibles lors de ces différents mouvements sont résumées sur la figure 2.

Notre objectif est de développer un générateur incorporé sur le corps humain et pouvant produire 100 µW pour adresser les capteurs portables (voir Fig. 1). A partir de la figure 2, on peut noter qu'il serait intéressant de pouvoir positionner ce générateur au niveau du genou (insert de la figure 2) lors de la marche (fréquence de 1 Hz) ou de la course à pied (fréquence de 2 Hz).

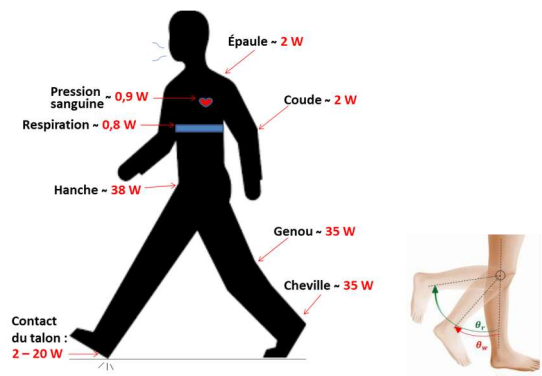


Fig. 2 : Puissance disponible sur le corps humain lors du mouvement

Différentes technologies peuvent être adoptées pour réaliser ces générateurs. On peut les regrouper principalement en trois catégories suivant le mécanisme physique qui sera mis en jeu. On va ainsi trouver des générateurs électromagnétiques, des générateurs électrostatiques et des générateurs piézoélectriques. Les principaux avantages et inconvénients de ces différentes technologies sont résumés dans les tableaux 1-2 extraits des références [2] et [3]. Les générateurs électromagnétiques sont intéressants en terme d'énergie récupérée mais sont plus difficilement intégrables pour les applications portables sur le corps humain du fait de la présence de bobines notamment. Les matériaux piézoélectriques présentent également des avantages en terme de densité de puissance générée et leur facilité d'utilisation. Les céramiques piézoélectriques ne sont cependant pas les mieux adaptées pour les applications portables (leur fréquence augmente avec leur miniaturisation) et on leur préférera les piézo-polymères de type polyfluorure de vinyle (PVDF) et ses dérivés. Concernant les générateurs électrostatiques, les polymères souples de type élastomères sont les plus adaptés pour ces applications (on parlera alors de polymères électro-actifs) et on trouvera principalement des silicones et des acrylates. Le tableau 3 compare les performances des piézo-polymères PVDF et des deux élastomères [4].

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des générateurs électromagnétiques, électrostatiques et piézoélectriques selon [2].

Type	Advantages	Disadvantages
Electromagnetic	<ul style="list-style-type: none"> no need of smart material no external voltage source 	<ul style="list-style-type: none"> bulky size: magnets and pick-up coil difficult to integrate with MEMS max voltage of 0.1V
Electrostatic	<ul style="list-style-type: none"> no need of smart material compatible with MEMS voltages of 2-10V 	<ul style="list-style-type: none"> external voltage (or charge) source mechanical constraints needed capacitive
Piezoelectric	<ul style="list-style-type: none"> no external voltage source high voltages of 2-10V compact configuration compatible with MEMS high coupling in single crystals 	<ul style="list-style-type: none"> depolarization brittleness in PZT poor coupling in piezo-film (PVDF) charge leakage high output impedance

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des générateurs électromagnétiques, électrostatiques et piézoélectriques selon [3].



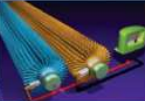
Mechanical energy harvesting	Electromagnetic	Electrostatic	Piezoelectric
			
Harvesting principle	Electromagnetic induction	Electrostatic induction	Piezoelectric effect & Electrostatic induction
Impedance type	Resistive	Capacitive	Capacitive
Pros	High efficiency, easy to scale up	Light weight	Easy to scale down to nanoscale
Cons	Heavy magnet required, low output for small-scale devices	Precharge required, low output, high matched impedance	Low output & low efficiency, pulsed output, high matched impedance

Tableau 3 : Comparaison des performances des piézo-électrets et des élastomères diélectriques [4].

	Piezopolymers			Dielectric elastomers (DE)	
	PVDF	Silicone	Acrylic		
Density [g.cm ⁻³]	1.7 - 2.1	1	1		
Young's modulus [GPa]	2.5 - 3.2	1×10 ⁻³	2×10 ⁻³		
Maximum stress [MPa]	5	3	7.2		
Maximum strain [%]	0.1	100	400		
Maximum energy scavenging density [J.cm ⁻³]	0.06	1.63	4.1		

On peut noter qu'une densité d'énergie récupérée supérieure à 1 J/cm est possible avec les élastomères diélectriques (silicone et acrylates), les rendant ainsi attractifs par rapport aux piézo-polymères. Notre choix pour la réalisation de notre générateur s'est donc porté sur ces élastomères nous imposant par la même occasion une technologie de type électrostatique.

Dans ce contexte, nous avons développé un premier générateur souple d'énergie conçu à partir d'élastomères incorporés entre deux électrodes déformables et fonctionnant suivant un mode électrostatique. La démonstration de la faisabilité de ce prototype ayant été faite [5], l'objectif est maintenant d'optimiser les performances de ce générateur en terme d'énergie récupérée, de durée de vie et d'adaptabilité sur le corps humain.

Après une brève présentation du dispositif originel, nous identifions les points d'amélioration sur lesquels une augmentation significative des performances en puissance est attendue. Nous présentons alors les solutions technologiques retenues et ces dernières sont validées dans la réalisation d'un générateur électrostatique autonome souple de seconde génération présentant des performances électriques 40% supérieures à celles obtenues avec notre premier prototype.

2. DEVELOPPEMENT D'UN GENERATEUR ELECTROSTATIQUE SOUPLE DE SECONDE GENERATION

2.1. Identification des points d'amélioration sur le premier prototype

Le premier prototype de générateur électrostatique souple (Fig.3) est constitué d'un support triangulaire sur lequel est déposé une électrode conductrice et un électret de type téflon. Le polymère électro-actif (en jaune sur le dessin) repose sur les bords de l'électret et est revêtu d'une pâte conductrice. Un gap d'air est présent entre l'électret et le polymère électro-actif. Lorsque la structure est étirée mécaniquement, la capacité de l'air va augmenter. Un courant va apparaître dans le circuit extérieur (représenté par la résistance R). Le courant s'inverse lorsque la structure est mécaniquement relâchée. Il y a donc circulation d'un courant périodique, typiquement à la fréquence de 1 Hz ou 2 Hz, correspondant aux fréquences d'excitation de la structure.

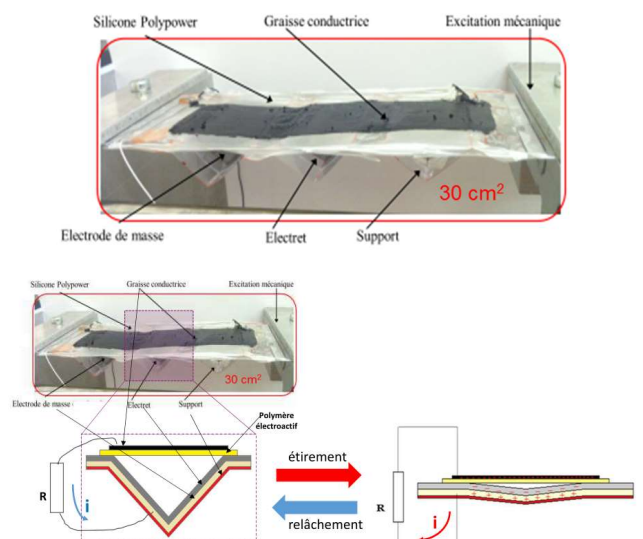


Fig. 3. Premier prototype de générateur électrostatique souple autonome et principe de fonctionnement

Le polymère électroactif utilisé était un élastomère silicone métallisé « polypower » commercialisé par la société Danfoss. La question d'insérer cet élastomère, plutôt que de laisser comme isolant de l'air, s'est posée. La figure 4 compare la puissance récupérée en fonction de la résistance de charge en présence et en absence de cet élastomère. On comprend aisément l'apport de cet élastomère dans la valeur de la puissance récupérée.

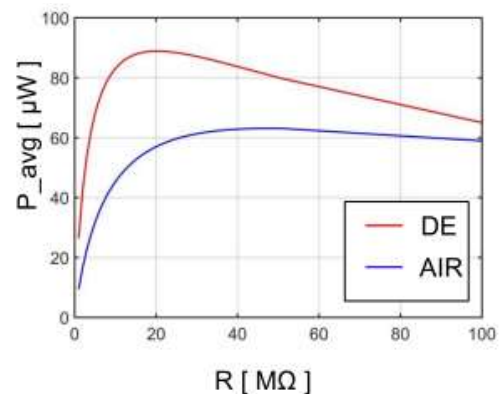


Fig. 4. Puissance générée par le prototype présenté sur la figure 3 en fonction de la résistance de charge. Puissance récupérée en présence de l'élastomère diélectrique (DE) « polypower » et en absence de cet élastomère (air).

2.2. Mise en évidence de points d'amélioration sur le premier prototype. Solutions alternatives proposées

La structure triangulaire n'est pas optimale en terme de tenue mécanique notamment. Les contraintes mécaniques d'une telle géométrie modélisées sous Comsol Multiphysics ont montré de fortes valeurs de l'ordre de 8×10^8 Pa suivant le critère de von Mises (Fig.5). Des modélisations suivant diverses géométries ont permis de réduire ces contraintes. Ainsi une géométrie en forme de semi-arrondi a permis d'obtenir des contraintes mécaniques inférieures à 10^7 Pa (Fig.6) soit pratiquement un facteur 100 plus faible.

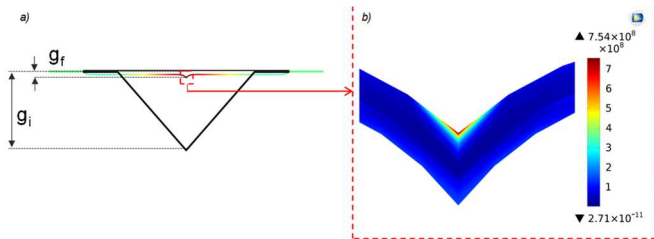


Fig. 5. Contraintes mécaniques en géométrie triangulaire

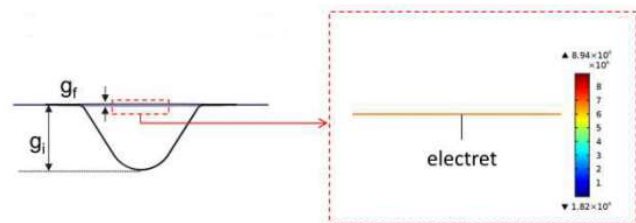


Fig. 6. Contraintes mécaniques en géométrie semi-arrondie

Si cette nouvelle géométrie est plus intéressante en terme de tenue mécanique, elle apporte en revanche un nouveau problème à résoudre. En effet, l'utilisation du téflon comme électret n'est alors plus possible car sa rigidité ne lui permet pas d'épouser cette forme arrondie. Il a fallu alors rechercher un polymère pouvant se déposer sur des géométries complexes et nous nous sommes alors tournés vers différentes familles de polymères de type parylène. Le parylène C a déjà été étudié en tant qu'électret [6] mais son caractère polaire n'en fait pas un excellent candidat sur des durées de fonctionnement de plusieurs années. Une originalité a consisté à étudier des parylènes fluorés de type AF4 dont la structure chimique est présentée sur la figure 7.

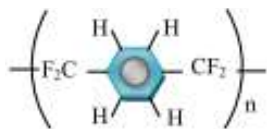


Fig. 7. Structure chimique du parylène AF4

Ces matériaux se déposent en couche fine par un procédé CVD (dépôt chimique en phase vapeur) et sont particulièrement conformant ; en d'autres termes, ils peuvent recouvrir des géométries particulièrement tortueuses.

A partir d'une décharge couronne permettant d'injecter des ions à la surface du polymère (Fig. 8) et la mesure du potentiel de surface au cours du temps à partir d'une sonde sans contact, nous avons ainsi pu évaluer les potentialités du parylène AF4 à

conserver des charges. Les mesures effectuées sur une durée de 100 jours après avoir réalisé une décharge positive ou négative confirment que ce polymère constitue un électret intéressant (Fig. 9). Pour comparaison, un parylène C de même épaisseur (6 μm) montre une chute relativement brutale durant les premières 24 heures (passage de 1000 V à 400 V) alors qu'au bout de 100 jours, on peut noter que 500 V sont encore présents sur le parylène AF4. Cette différence de comportement confirme le caractère polaire du parylène C dont les dipôles vont s'orienter pour compenser la charge ionique déposée. Le caractère apolaire du parylène AF4 évite cette forte chute et il a été ainsi sélectionné comme nouvel électret pour notre application.

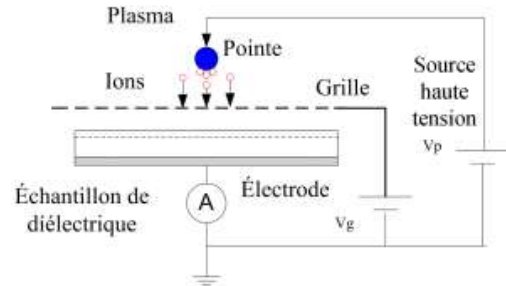


Fig. 8. Principe de la décharge couronne pour l'implantation de charges

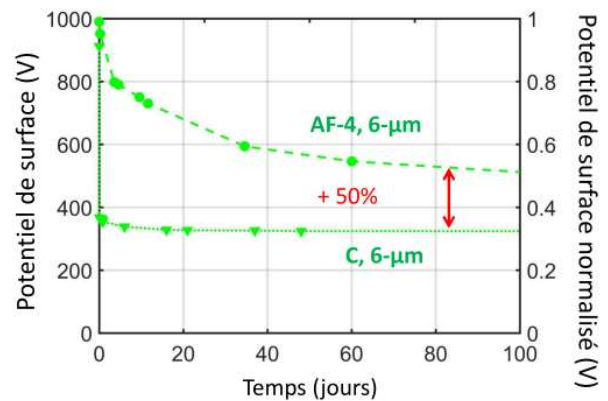


Fig. 9. Comparaison du potentiel à la surface du parylène AF4 et du parylène C pour une même épaisseur de matériau et après une décharge couronne effectuée pour un dépôt initial à 1000 V.

Afin de nous assurer que l'électret pouvait conserver les charges piégées dans différentes conditions climatiques, nous avons testé ses capacités en prenant comme paramètres de stress l'humidex [7] qui est régie par l'équation suivante :

$$Humidex = T_{air} + 0.56 \times \left[6.11 \times e^{5417.75 \left(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{T_{dew}} \right)} - 10 \right]$$

Où T_{air} est la température de l'air en degré Celsius et T_{dew} est la température en kelvin du point de rosée. L'humidex peut alors être mis en relation avec le bien-être du corps humain comme résumé dans le tableau 4.

Tableau 4 : Bien-être du corps humain suivant l'indice humidex [8].

ZONE	HUMIDEX RANGE	EFFECT ON HUMAN BODY
1	Less than 29	Little or no discomfort
2	30 to 34	Noticeable discomfort
3	35 to 39	Evident discomfort
4	40 to 45	Intense discomfort
5	Above 45	Dangerous discomfort
6	Above 54	Heat stroke probable

Le test a été réalisé à 30°C avec une humidité relative (RH) de 60% ce qui correspond à un humidex de 39. Ces conditions ont été maintenues pendant 1 heure puis l'échantillon a été ramené aux conditions ambiantes de la salle d'expérience. L'échantillon testé était un parylène AF4 d'épaisseur 9 μm qui avait été au préalable chargé par décharge couronne puis conservé durant 200 jours.

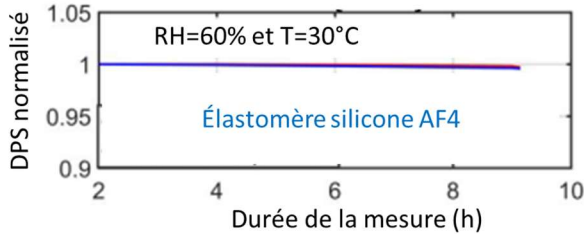


Fig. 10. Evolution du potentiel de surface normalisé après que le parylène AF4 a subi un humidex de 39.

La mesure a été enregistrée pendant les 9 heures qui ont suivi le stress. Le potentiel en surface (DPS) normalisé est reporté sur la figure 10 et montre la bonne tenue du polymère pour la conservation des charges stockées démontrant ainsi ses bonnes performances en qualité d'électret.

2.3. Performances du nouveau prototype

Le nouveau générateur électrostatique incorpore du parylène fluoré AF4 en remplacement du téflon et la géométrie triangulaire a laissé place à une géométrie semi-arrondie.

Les performances obtenues sous des cycles d'étirement et de relâchement de 1 Hz sont reportées sur la figure 11 en ce qui concerne la tension et sur la figure 12 au niveau de la puissance. Les tensions sont bien reproduites à chaque cycle. Par ailleurs, une puissance en sortie de 49 μW est atteinte pour une résistance optimale de 150 $\text{M}\Omega$. Cette puissance est supérieure de 45% à la valeur maximale obtenue avec le premier prototype.

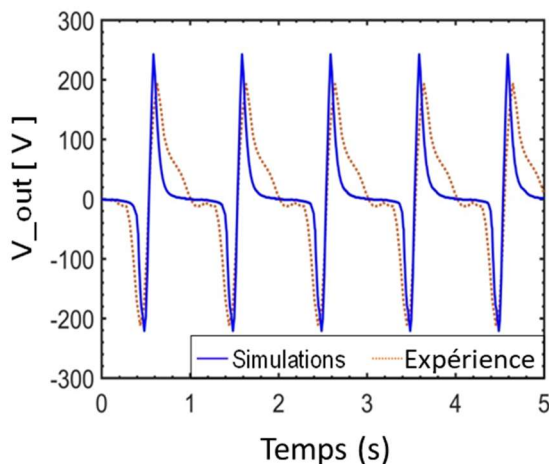


Fig. 11. Tension obtenue à la sortie du nouveau prototype lors de cycles d'étirement de 1 Hz

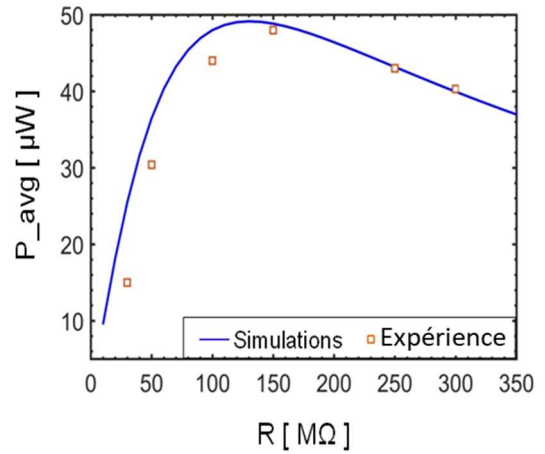


Fig. 12. Puissance obtenue à la sortie du nouveau prototype lors de cycles d'étirement de 1 Hz.

3. CONCLUSIONS

Un nouveau générateur souple autonome d'énergie embarqué pouvant se positionner au niveau de l'articulation du genou a été proposé. Ce générateur peut délivrer une puissance de 49 μW mais cette valeur peut facilement être amplifiée en démultipliant et en agencant judicieusement les cellules unitaires constituant ce générateur. L'originalité de ce générateur réside également dans l'incorporation d'un électret constitué d'un fluoro-parylène dont nous avons démontré les capacités sur une durée de 1 an et pour des conditions environnementales correspondant à un humidex de 39.

4. REMERCIEMENTS

Programme ARC4 Energie 2014 de la région Auvergne Rhône-Alpes et ANR SEASEA.

5. REFERENCES

- [1] D. Briand, E. Yeatman and S. Roundy, "Micro Energy Harvesting", John Wiley & Sons, 2015.
- [2] L. Wang and F.G. Yuan, "Energy harvesting by magnetostrictive material (MsM) for powering wireless sensors in SHM", 14th International Symposium SPIE Smart Structures and Materials & NDE and Health Monitoring, 2007.
- [3] Z. L. Wang, "On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators", Materials Today, vol.20, n°2, March 2017.
- [4] X. Yuan, S. Changgeng, G. Yan, and Z. Zhenghong, "Application review of dielectric electroactive polymers (DEAPs) and piezoelectric materials for vibration energy harvesting," J. Phys. Conf. Ser., vol. 744, no. 1, p. 012077, 2016.
- [5] T. Vu Cong, C. Jean-Mistral and A. Sylvestre, "Electrets substituting external bias voltage in dielectric elastomer generators: application to human motion", Smart Mater. Struct. 22, 025012, 2013.
- [6] S. Genter and O. Paul, « Parylene-C as an electret material for micro energy harvesting », PowerMEMS 2012, Atlanta, USA, 2012.
- [7] F. Cottone, P. Basset, F. Marty, D. Galayko, L. Gammaitoni and T. Bourouina, "Electrostatic generator with free micro-ball and elastic stoppers for low-frequency vibration harvesting," IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp. 385–388, 2014.
- [8] T. Galchev, R. Raz and O. Paul, "An electrostatic springless inertial harvester for converting multi-dimensional low-frequency motion," IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp. 102–105, 2013.