The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Study on Novel Electrostatic Bi-directional Transducers to Realize Low Power MEMS Devices for Wireless Sensors
Author(s)	内藤, 康幸
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/73584
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　内　藤　康　幸　）	
論文題名	Study on Novel Electrostatic Bi-directional Transducers to Realize Low Power MEMS Devices for Wireless Sensors (無線センサ用低電力MEMSデバイス向け 静電双方向トランスデューサに関する研究)

論文内容の要旨

あらゆる機器をインターネットにつなげ、より高い利便性のサービス・ソリューションを提供するIoT（Internet of Things）の実現が期待されている。このためにはセンサネッワークが必要であるが、膨大な数のセンサに通信や電源用の配線を張り巡らすことが困難である。無線センサモジュールの実現に向け、無線・回路デバイスおよびそれらを駆動する発電器を微小電気機械素子（MEMS：Micro-electro-mechanical systems）により高性能化する研究が行われている。高周波RFスイッチ・発振器の低消費電力・低駆動電圧化、振動発電器の高出力化が課題であり、本論は、静電場により双方向に駆動する変換器（トランスデューサ）の有効性を明らかにすることを目的とした。

通信方式に合わせて無線回路の静電容量を切り替えるRF-MEMSスイッチングデバイスにおいて、静電容量を形成する可動電極を10 V以下の低電圧かつ10 μs以下の高速応答で駆動することが求められる。このためには、可動電極のバネ定数を下げ、低電圧で発生する弱い静電力で変位させることが有効であるが、元の位置に戻すバネ力が弱く、応答時間が長くなる課題ある。本論では、可動電極と同じ層に櫛歯型の電極を形成し、櫛歯間に電圧を印加することにより静電力を発生させ復元力を高めた新規の垂直櫛歯駆動アクチュエータを考案した。電極2層の簡易な低コスト構造で可動電極を静電力により双方向に駆動させることを可能とし、低駆動電圧5 V・高速応答8 μsで容量変化比5.4、連続駆動回数10^7の可変容量を実現した。

無線回路を切り替えるRF-MEMSスイッチは、可変容量より高い高周波信号のスイッチング比が求められる。電極間隔を拡げ静電容量の変化比を増大させる方法があるが、駆動電圧が高く応答速度が遅くなる課題がある。本論では、基板に対して水平方向に可動な3本の電極により、1つのスイッチに直列と並列接続のスイッチ機能を持たせ、OFF時に高周波信号が出力ポートに伝搬しないよう並列接続のスイッチに逃がす新規のアクチュエータ構造を考案した。第1の電極と第2の電極間、および第2の電極と第3の電極間にそれぞれ電圧を印加することにより、電極1層の簡易な低コスト構造でON・OFF時とも双方向に静電力を発生させることが可能となり、低駆動電圧9 V・高速応答5 μsを実現した。

回路の同期を取るタイミングデバイスには、高精度な周波数の信号を発生する発振器が必要である。水晶の共振器に替わり小型・低コストなMEMSによる共振器の実現が期待されており、信号の先鋭度を表すQ値を高め、駆動電圧を下げることが求められる。本論では、静電力によりエネルギー損失の低い双方向共振を誘発するため、単結晶Siによる三角柱型のねじり振動子とし、かつ空気粘性によるエネルギー損失を排除するため、低コストなSiGe/Al薄膜による真空パッケージ構造を考案した。低駆動電圧1 Vで共振周波数20 MHz、高Q値220,201、連続駆動4,000時間（室温・大気圧中）を実現し、20 MHzの信号発振動作を実証した。

無線センサモジュールの応用として、自動車のタイヤの空気圧や路面から振動情報をセンシングし、快適かつ安全なドライビングを実現するタイヤセンサへの適用が考えられている。タイヤの振動エネルギーを電力に変換する振動発電器を小型・低コストなMEMSにより実現することが求められるが、タイヤのインパクト振動による発電量は数μWと低く、低消費電力回路を駆動させるためには少なくとも1桁の高出力化が必要である。本論では、60 km/h走行時において振動子の共振周波数をインパクト振動の高周波数帯1.2 kHzに設定することにより、低い振動エネルギー密度5.0×10^{-3} $g^2\cdot Hz^{-1}$においても効率良くエネルギーを回収する構造を考案した。外部振動よる振動子の双方向変位量に対し、電荷保持材料（エレクレット）の凸部と出力電極間の静電容量が線形に変化する電極構造を考案し、出力信号波形を乱れのない正弦波とすることによりエネルギー損失を低減した。デバイス面積1 cm^2と小型ながらも正弦波振動下で発電量495 μW、インパクト振動下で60 μWの高出力化を実現した。

以上本論において、RF-MEMSスイッチ・MEMS発振器の低駆動電圧化、MEMS振動発電器の高出力化に静電双方向トランスデューサが有効であることを明らかにし、IoT時代の無線センサモジュールの実現に向けた低電力MEMSデバイスの実現性を実証した。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　内藤　康幸　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	上西　啓介
	副 査	教授	山本　孝夫
	副 査	准教授	森　裕章
	副 査	准教授	福本　信次

論文審査の結果の要旨

IoT（Internet of Things）とはもののインターネットとも呼ばれ、これまでのコンピュータと人をつなぐインターネットの世界から、あらゆる機器をインターネットにつなげ、より高い利便性のサービス・ソリューションを提供することが期待されている。この実現には各種センサの開発と多様なセンサ間をつなぐセンサネッワークの構築が不可欠であるが、ネットワーク構築に際して、膨大な数のセンサに通信や電源用の優先での配線を張り巡らすことには限界があり、無線センサモジュールの実現に向け、無線・回路デバイスおよびそれらを駆動する発電器を微小電気機械素子（MEMS：Micro-electro-mechanical systems）により高性能化する研究が精力的に行われている。高周波 RF スイッチ・発振器では低消費電力・低駆動電圧化が、振動発電器では高出力化が、現状の課題として指摘されている。

本研究論文は、それらのスイッチングデバイスと発電器の課題を解決するために、静電場により双方向に駆動する変換器（トランスデューサ）を適用し、その有効性を明らかにすることを目的とした。以下にその成果を要約する。

(1) RF-MEMS スイッチングデバイスにおいて、静電容量を形成する可動電極を低電圧かつ高速応答で駆動することが求められる。本研究では、可動電極と同じ層に櫛歯型の電極を形成し、櫛歯間に電圧を印加することにより静電力を発生させ復元力を高めた新規の垂直櫛歯駆動アクチュエータを考案した。その結果、低コスト構造で可動電極が静電力により双方向に駆動することを可能とし、駆動電圧 5 V、高速応答 8 μs にまで性能を高めた。

(2) 可変容量より高い高周波信号のスイッチング比が求められる RF-MEMS スイッチにおいては、基板に対して水平方向に可動な 3 本の電極を用いた新たなのアクチュエータ構造を導入した。その結果、他の方法では駆動電圧が高く応答速度が遅くなる課題が、3 本の各電極間に電圧を印加することにより、簡易な低コスト構造で ON・OFF 時とも双方向に静電力を発生させることが可能となり、低駆動電圧で高速に応答することを実証した。

(3) 回路の同期を取るタイミングデバイスには、水晶の共振器に代替となる、単結晶 Si による三角柱型のねじり振動子を SiGe/Al 薄膜による真空パッケージした構造をもつ小型・低コストな MEMS による共振器を考案した。その結果、エネルギー損失の低い双方向共振が誘発され、1V の低駆動電圧で共振周波数 20 MHz で、高い性能で信号発振動作することを実証した。

(4) 無線センサモジュールの応用として、自動車のタイヤの振動エネルギーを電力に変換する振動発電器について、外部振動よる振動子の双方向変位量に対し、電荷保持材料の凸部と出力電極間の静電容量が線形に変化する電極構造を考案することにより、低い振動エネルギー密度においても低損失かつ高効率でエネルギーを回収できることを検証した。

以上のように本論文は、RF-MEMS スイッチ・MEMS 発振器の低駆動電圧化、MEMS 振動発電器の高出力化に静電双方向トランスデューサが有効であることを明らかにした先進的な成果を多数含む論文である。本論文により示されたこれらの知見は，今後の間近に迫っている IoT 時代の基礎要素となる無線センサモジュール開発について実践的な方向性を示唆する価値を有しており，　よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。