

# 博士論文要旨

## 論文題名: MEMS 共振器デバイスシミュレーションについての研究

たにがわ ひろし  
谷川 紘

通信技術の進展に伴い MEMS (Microelectromechanical Systems) 共振器デバイスへの期待が高まっている。MEMS は電気系と機械系が融合しているので両者を勘案した設計が重要である。機械系設計においては、縮小則を使えば従来の構造解析シミュレータを用いて代表的寸法が mm 以下の MEMS デバイスを解析することが可能である。しかし、機械系シミュレータは電気系とのリンクが不十分で、電気量の 2 次元的な広がりや考慮できないなどの限界があった。近年、複数の物理分野を一括して解析できるマルチフィジックスシミュレータが登場して MEMS デバイスの高度な解析が可能となっている。

本論文では、MEMS 共振器デバイスの特性評価/設計分野において、種々のシミュレーションを活用した下記の研究成果を記載している。

1) ビーム型共振器デバイスの 3 次元的な機械振動は電界の 2 次元的な広がりやに影響されていることをシミュレーションで示し、またこれを実験で検証した。また、構造と駆動法の改良によって特性が大幅に改善することを明らかにした。

2) 静電駆動型の MEMS デバイスでは電気機械変換効率を支配する駆動電極と共振電極間のギャップを狭くすることが必須である。微細加工技術による方法と、駆動電極を共振電極側へ移動させる (移動電極) 方法とを用いて狭ギャップを形成したデバイスを設計作製して、シミュレーションと実験結果を比較した。サブミクロン寸法のギャップをもつデバイスの電気機械変換効率が大幅に改善され、定量的にも両者が良く一致していることを明らかにした。

3) 多周波数対応が可能なフィッシュボーン型デバイスを設計試作し実測で得られた特性をシミュレーション結果と比較した。解析ではマルチフィジックスシミュレータを使用し、共振器に作用する 3 つの力によるビームの変形量の総和がデバイス特性を決定しているとして、それぞれの力によるビーム変形量を求め、これが実測結果に合致することを示した。また、任意の共振周波数での特性最適化のためのアルゴリズムを提案し、複数の駆動電極の励振電圧を最適に設定することにより 1 次から高次の任意のモードで共振させることができることを実測で検証した。

4) PN 接合空乏層を利用して MEMS 共振器の狭ギャップを形成するという新しい動作原理を実証するためカンチレバー型アクチュエータを設計試作した。この実測結果は、空乏層を空間電荷領域と仮定したモデルの解析結果と良く合致した。

MEMS 共振器デバイスは無線機器の性能向上に大きく貢献できるので今後も多種のデバイスが提案・開発されると思われる。本論文では、複数の MEMS 共振器デバイスの開発を通して、動作解明、実測値との対応付け、設計指針などにシミュレーション技術、特にマルチフィジックス環境での解析技術が有効であることを明らかにした。ここに得られた多くの成果は将来のデバイス実現に向けて有力な知見を提供するものである。

## **Abstract of Doctoral Thesis**

### **Title : Study of MEMS Resonator Devices and Simulation**

たにがわ ひろし  
TANIGAWA Hiroshi

MEMS (Microelectromechanical Systems) resonators are expected to be essential in future wireless communication equipment. As electronics and mechanics are combined together in MEMS devices, the design technologies based on both these fields are necessary. Conventional structure analysis software programs can be applied, using a scaling rule, to the MEMS devices, which have less than several mm in size. However, no link among different physical systems in these simulators sets limitation on MEMS analysis. Recently, multi-physics simulators have been available to provide MEMS devices with sophisticated analysis and design.

In this thesis, device simulations on MEMS resonators are researched. For a fixed-fixed beam resonator, three dimensional mechanical vibrations are generated by two dimensional electric fields. The comparison with experimental results clarifies the device structure and driving scheme for improved characteristics.

For electrostatic MEMS devices, gap narrowing is very important, because electromechanical transduction efficiency mostly depends on gap length. Two types of devices are evaluated: one is fabricated by a fine pattern fabrication process and the other by moving a driving electrode in post-process to form a sub-micron narrow gap. In both devices the transduction efficiency are greatly improved owing to the narrow gap.

The induced forces in a fishbone-shaped resonator are precisely analyzed by using a multi-physics simulator. The success in demonstration of resonant frequency selections is also shown.

A simple cantilever type actuator, which belongs to the newly proposed MEMS device that has solid gap instead of air narrow gap, is evaluated. In this device, a depletion layer in pn junction acts as a gap for the resonators. Multi-physics simulation results qualitatively agree with the experimental ones.

Many kinds of MEMS resonators, contributing improvements in wireless equipment, will be proposed and developed from now on. The research results obtained in this thesis give useful knowledge to realize these MEMS devices.