
Abstract

Nanoelectromechanical systems (NEMS) have been the focus of recent applied and fundamental research. With critical dimensions down to a few tens of nm, most NEMS are used working in resonance. In this size regime, they display high fundamental resonance frequencies, diminished active masses, tolerable force constants and relatively high quality factors in the range of $10^2 - 10^4$. These attributes collectively make NEMS suitable for a multitude of technological applications such as ultrasensitive force and mass sensing, narrow band filtering, and time keeping. So as to fulfill their full promises, that is, to begin to come out of industrial foundries, a certain number of challenges are yet to be addressed: in particular, their frequency stability, *i.e.* their output carrier power has to be improved. Mechanical transduction gain of the devices has been thoroughly studied, but the drive power has always been a priori limited to the onset of nonlinearities. Besides, the smaller the structures, the sooner nonlinearities occur, reducing their dynamic range and even making extremely difficult to detect their oscillation, as the abundant literature about characterization techniques proves.

In this thesis, this limitation is reconsidered, *i.e.* the behavior of NEMS at large amplitude through the nonlinear dynamics of NEMS-based resonant sensors is investigated. A review of inertial, mass and gas sensors is carried out. Particularly, the design issues of resonant sensors are addressed and the sources of nonlinearities in clamped-clamped resonators and cantilevers are exposed. A review of nonlinear methods is also presented in order to define a modeling strategy for the dynamics of resonant accelerometers, gyroscopes and mass/gas sensors. Close-form solutions of the critical amplitudes were provided for several devices and the importance of the fifth order nonlinearities has been demonstrated through the mixed behavior identification. Several analytical design rules are provided in order to enhance the dynamic range of NEMS resonators and the detection limit of NEMS-based resonant sensors. These rules essentially include hysteresis suppression by nonlinearity cancellation as well as mixed behavior and pull-in retarding under superharmonic resonance and simultaneous resonances leading to the possibility of driving the resonator linearly at high oscillations compared to the critical amplitude. The experimental validation of the model has been performed in the case of resonant capacitive ($4\ \mu\text{m}$ SOI) MEMS and ($2\ \mu\text{m}$ MEMS level/ $500\ \text{nm}$ NEMS level) SOI M&NEMS accelerometers and gyroscopes as well as capacitive (fabricated using nanostencil lithography) and piezoresistive ($160\ \text{nm}$ SOI NEMS) gas/mass sensors.

Keywords

Nonlinear dynamics, resonator, MEMS and NEMS, dynamics range, detection limit, resonant sensors, accelerometer, gyroscope, gas and mass sensors, design rules, superharmonic resonance, simultaneous resonances, mixed behavior, pull-in, critical amplitude

Résumé

Les systèmes nano-électromécaniques (NEMS) sont au centre de la recherche appliquée et fondamentale. Avec des dimensions critiques de quelques dizaines de nanomètres, la plupart des NEMS fonctionnent en mode résonant. A cette échelle, leur fréquence fondamentale est rejetée à plusieurs MHz, et ils bénéficient d'une masse faible, d'une raideur active et de facteurs de qualité dans la gamme de 100 à 10000. Ces attributs rendent collectivement les NEMS appropriés à une multitude d'applications technologiques telles que les capteurs ultrasensibles d'accélération, de force et de masse, les filtres et les oscillateurs pour base de temps. Afin que les résonateurs NEMS tiennent leurs promesses et répondent aux attentes sociétales, un certain nombre de défis et verrous technologiques restent à lever. En particulier, la stabilité en fréquence, cest à dire la puissance de porteuse, doit être améliorée. Le gain mécanique de transduction des NEMS a été analysé avec grand intérêt mais la sensibilité a toujours été a priori limitée par l'apparition des non-linéarités. En outre, la miniaturisation des structures descend les seuils d'apparition des non-linéarités, réduit donc la gamme dynamique et complique la détection de leur oscillation.

La thèse reconsidère la limitation de détection des NEMS. Le comportement de NEMS résonants en grands déplacements est analysé en déployant les techniques de la dynamique non linéaire et validé grâce à des méthodes de caractérisation électrique du domaine des NEMS. Tout d'abord il est établi un état de l'art de certaines catégories de capteurs. Suit une présentation des problèmes de conception des capteurs résonants puis des sources de non linéarités. L'état de l'art des méthodes non linéaires permet de dégager une stratégie de modélisation des capteurs résonants M&NEMS, inertiels, de gaz et de masse. Les expressions analytiques des amplitudes critiques sont données pour plusieurs dispositifs et l'importance des non-linéarités d'ordre cinq a été démontrée par l'identification analytique et l'analyse expérimentale du comportement non linéaire mixte, combinant raidissement et assouplissement, indiquée par la réponse harmonique. Enfin la thèse préconise plusieurs règles de conception analytique afin d'optimiser la gamme dynamique des résonateurs NEMS et la limite de détection des capteurs résonant M&NEMS. Pour cela il s'agit de supprimer tout phénomène d'hystérésis par l'annulation des non-linéarités d'ordre trois, de retarder le comportement mixte et le pull-in (collage du résonateur sur l'électrode) en déclenchant des résonances super harmoniques et des résonances simultanées garantissant le comportement linéaire du résonateur au delà de l'amplitude critique. La validation expérimentale des modèles a été effectuée sur des capteurs inertiels MEMS et M&NEMS à transduction capacitive résonante ainsi que sur des nano capteurs de gaz et de masse à transduction capacitive avec cointégration CMOS et piézorésistive.

Mots-clés

Dynamique non-linéaire, résonateur, MEMS et NEMS, gamme dynamique, limite de détection, capteurs résonants, accéléromètres, gyromètres, capteurs de gaz et de masse, règles de conception, résonance superharmonique, résonances simultanées, comportement non-linéaire mixte, pull-in, amplitude critique
