

Diss. ETH No. 21508

# **Integration Platform for Tunable Carbon Nanotube Electromechanical Resonators**

A dissertation submitted to

ETH Zurich

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Shih-Wei Lee

MSc ME, NTHU

born October 27, 1980

citizen of Taiwan, Republic of China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Christofer Hierold, examiner

Prof. Dr. Nico de Rooij, co-examiner

2013

## Abstract

Carbon nanotubes (CNTs) possess several outstanding material properties, such as high stiffness, light weight, and one-dimensional structures. These are key factors for high resonant frequency of a vibration structure. Hence, CNTs are promising nano-materials for high frequency resonators. Moreover, the already high resonant frequency of a suspended CNT can be further increased by applying strain. Micro-actuation by a MEMS actuator can reduce the slack of the suspended CNT and increase strain upon the CNT, which enables a broad tunable frequency range from MHz to GHz. In this study, a scalable CNT-MEMS integration platform was developed, and the first tunable CNT resonator with an embedded MEMS actuation system was demonstrated.

To integrate a low-defect suspended CNT into a pre-defined MEMS actuator, a fabrication process has been developed. Using top-down micro-machining, a temporary supporting structure is fabricated so as to avoid physical rupture of suspended CNTs during wet processing. In addition, an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer is deposited by atomic layer deposition (ALD) to protect as-grown CNTs from resist contamination during post-growth processing. The post-growth wet processing enables the metallization on top of as-grown CNTs by lift-off. The patterned metals provide improved electrical contacts and robust doubly-clamped configuration. Based on the developed integration process, the influence of processing conditions on CNT performance and the long-term stability of device resistance were investigated.

To adjust the strain on the integrated CNT, a micro-actuation system was designed. The system was driven by an electro-thermal bent-beam actuator. To avoid electrical and thermal interferences between the actuator and CNT device, an insulation mechanical configuration, called adapter, was designed. This adapter is compact, and it consists of only two discrete silicon structures. More importantly, it can be fabricated using the developed integration process. This adapter can electro-thermally insulate the CNT from the actuator, while the CNT is strained by the actuator. Hence, the investigation the CNT electrical response to strain is possible.

The entire integrated CNT-MEMS device, including a suspended CNT, an adapter, and a thermal actuator, can be fabricated using the developed integration process. The functionality of the fabricated CNT-MEMS device was first verified by quasi-static

electromechanical loading tests. The electrical current variations of the strained CNTs were measured during the tensile tests. The reproducible and reversible strain-induced current modulation of the tested CNTs confirms the device functionality. In the final dynamic characterization, the resonant frequency of the suspended CNT was tuned by driving the actuator. The frequency modulation mechanism was attributed to the reduction of the slack of the CNT. This demonstrates a tunable CNT resonator and confirms the capability of the integration platform.

## Zusammenfassung

Kohlenstoffnanoröhren (CNTs) besitzen viele herausragende Materialeigenschaften, wie z.B. hohe Steifigkeit, geringes Gewicht und eine eindimensionale Struktur. Diese sind Schlüsselfaktoren für hohe Resonanzfrequenzen einer schwingenden Struktur. Daher sind CNTs vielversprechende Nanomaterialien für Hochfrequenzresonatoren. Ausserdem kann die Resonanzfrequenz einer freihängenden CNT durch Dehnung noch weiter erhöht werden. Mikroaktuation durch einen MEMS-Aktuator kann den Durchhang der freihängenden CNT verringern und die mechanische Spannung erhöhen, wodurch ein breit einstellbarer Frequenzbereich von MHz bis GHz ermöglicht wird. In dieser Studie wurde eine skalierbare CNT-MEMS Integrationsplattform entwickelt und der erste einstellbare CNT-Resonator mit integriertem MEMS-Aktuationssystem demonstriert.

Ein Integrationsprozess wurde entwickelt, um eine frei hängende CNT niedriger Defektdichte in einen MEMS-Aktuator zu integrieren. Unter Verwendung von Top-down-Mikrofabrikation wird eine temporär stützende Struktur hergestellt, die ein Reißen der freihängenden Struktur während der Nassprozessierung verhindert. Zusätzlich wird eine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht durch Atomlagenabscheidung aufgebracht, um die gewachsenen CNTs während der Prozessierung nach dem Wachstum vor Kontamination mit Photolack zu schützen. Die Nassprozessierung nach dem Wachstum ermöglicht die Metallisierung auf CNTs durch ein Lift-off-Verfahren. Die oben aufgebrachte Metallisierung bietet verbesserte elektrische Kontakte und eine robuste, beidseitig geklemmte Konfiguration. Unter Verwendung des entwickelten Integrationsprozesses wurden der Einfluss von Prozessschritten auf die Betriebseigenschaften der CNTs und die Langzeitstabilität des Bauteilwiderstands untersucht.

Um die Dehnung der integrierten CNT einzustellen, wurde ein Mikroaktuationssystem entworfen. Das System wird durch einen auf gebogenen Balken basierenden elektrothermischen Aktuator angetrieben. Um elektrische und thermische Störeinflüsse zwischen dem Aktuator und dem CNT Bauteil zu vermeiden, wurde ein isolierender mechanischer Aufbau, im Folgenden „Adapter“ genannt, entworfen. Dieser Adapter ist kompakt und besteht aus lediglich zwei separaten Siliziumstrukturen. Insbesondere kann er mit dem entwickelten Integrationsprozess hergestellt werden. Der Adapter kann die CNT elektrothermisch vom Aktuator isolieren, während die CNT durch den Aktuator gedehnt wird. Dies ermöglicht die Untersuchung der elektrischen Antwort der CNT auf Dehnung.

Das gesamte integrierte CNT-MEMS-Bauteil, das eine freistehende CNT, einen Adapter und einen thermischen Aktuator beinhaltet, kann mit dem entwickelten Integrationsprozess hergestellt werden. Die Funktionalität des gesamten CNT-MEMS-Bauteils wurde zuerst durch quasistatische elektromechanische Zugtests überprüft. Die Änderungen des elektrischen Stroms in den gedehnten CNTs wurden während des Zugtests gemessen. Die reproduzierbare und reversible durch Dehnung verursachte Strommodulation der getesteten CNTs bestätigt die Funktionalität der Bauteile. Bei der abschliessenden dynamischen Charakterisierung wurde die Resonanzfrequenz der freihängenden CNT durch den Aktuator eingestellt. Der Frequenzmodulationsmechanismus wurde zurückgeführt auf die Reduktion des Durchhangs der CNT. Somit wurde ein einstellbarer CNT-Resonator demonstriert und die vollständige Entwicklung der Integrationsplattform nachgewiesen.