

Diss. ETH No. 19095

**DIRECTING CARBON NANOTUBES AND GRAPHENE:  
FUNDAMENTALS AND PARALLEL DEVICE  
INTEGRATION USING DIELECTROPHORESIS**

A dissertation submitted to  
**ETH ZURICH**

for the degree  
**DOCTOR OF SCIENCES**

presented by  
**BRIAN R. BURG**  
Dipl. Masch.-Ing. ETH

born June 1, 1982  
citizen of Luxembourg and the United States of America

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Dimos Poulikakos, examiner  
Prof. Dr. Christofer Hierold, co-examiner

2010

# Abstract

The dielectrophoretic integration of carbon nanostructures for parallel sensor assembly is reported in the present thesis. The aim is to provide a viable avenue to ensure continuous miniaturization toward nanoelectromechanical systems (NEMS), driven by cost reduction, enhanced device functionality, and improved energy efficiency. It is proposed to employ directed assembly of high-symmetry low-dimensional materials, while always allowing parallel integration. For this purpose, the electrokinetic framework of dielectrophoretic deposition devices is first developed, in order to understand and exploit the occurrence and interaction of the different underlying effects in capacitively coupled systems when moving nano-sized particles to desired locations. In the following, a method for dispersing surface-synthesized individual single-walled carbon nanotubes (SWNTs) in ultrapure and long-term stable aqueous solutions by low energy input is introduced, which is necessary for the successful high-yield dielectrophoretic deposition of these one-dimensional carbon nanostructures. Electrical characterization on 223 low-resistance devices evidences the high quality of the SWNT solutions, raw material and contact interface. Subsequently, the dielectrophoretic separation of individual metallic SWNTs from heterogeneous solutions is proven. Their simultaneous deposition between electrodes is confirmed by direct electric transport measurements. A threshold separation frequency of 188 MHz is extracted from a surface-conductivity model and a conductivity weighting factor introduced to elucidate the separation frequency dependence. To show the versatility of the introduced methods, the parallel integration of SWNT based piezoresistive pressure sensors is demonstrated. Carbon nanotubes are dielectrophoretically placed at the membrane edges, the positions of largest strain. Highest sensitivity of the long-term stable devices is achieved in the off-state of small band gap carbon nanotubes (SGS-SWNTs), reaching values as high as  $S_0 \sim 0.25 \Delta R/R/\text{bar}$ , at a resolution better than 50 mbar, and power consumption of less than 40 nW. In the end, the dielectrophoretic integration of single- and few-layered graphenes, two-dimensional carbon nanostructures, is demonstrated. The above accomplishments allow new approaches to counter ongoing miniaturization efforts. Low cost solution based technologies are capable of assembling functional transducer elements up to 3 orders of magnitude smaller than the current state of the art while enhancing sensor resolution and significantly reducing drive current requirements.

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Doktorarbeit wird die dielektrophoretische Integration von Kohlenstoffnanostrukturen für deren parallele Sensorfabrikation untersucht. Ziel ist es dabei die Miniaturisierung von nanoelektromechanischen System weiterzuentwickeln, angetrieben von Kosteneinsparungen, erhöhter Funktionalität und reduziertem Energieverbrauch. Die gezielte Anordnung von Materialien hoher Symmetrie und niedriger Dimensionalität wird dafür in dieser Arbeit erforscht, unter Beibehaltung der parallelen Integrationsfähigkeit. Zu diesem Zweck wird zuerst das elektrokinetische Verhalten von dielektrophoretischen Ablagerungssystemen beschrieben, um die auftretenden Effekte und deren Interaktion in kapazitiv gekoppelten Systemen vollständig zu verstehen und dann gezielt ausnutzen zu können, wenn Partikel in der Größenordnung von einigen Nanometern mit hoher Effizienz gezielt auf eine Position gelenkt werden sollen. Im Folgenden wird eine Methode eingeführt, um mit niedrigem Energieaufwand einwandige Kohlenstoffnanoröhrchen, die in einem Oberflächenwachstumsprozess hergestellt worden sind, individuell in hochgradig sauberen und langzeitstabilen wässrigen Lösungen zu dispergieren. Diese Lösungen sind überaus bedeutend für eine hohe dielektrophoretische Integrationsausbeute dieser eindimensionalen Kohlenstoffnanostrukturen. Die elektrische Charakterisierung an 223 Einheiten mit niedrigem Widerstand bescheinigt die hohe Qualität der Kohlenstoffnanoröhrchenlösung, des Ausgangsmaterials und der elektrischen Kontakte. Anschliessend wird die dielektrophoretische Trennung von einzelnen metallischen Kohlenstoffnanoröhrchen aus heterogenen Lösungen nachgewiesen. Direkte elektrische Transportmessungen bestätigen ihre simultane Ablagerung zwischen Elektroden. Eine Trennungsfrequenz von 188 MHz wird von einem Oberflächenleitfähigkeitsmodell entnommen und die Abhängigkeit der Trennungsfrequenz von einem eingeführten Leitfähigkeitsverhältnis untersucht. Die Vielseitigkeit der entwickelten Methoden wird durch die parallele Integration von Kohlenstoffnanoröhrchen in piezoresistive Drucksensoren unter Beweis gestellt. Kohlenstoffnanoröhrchen werden dielektrophoretisch gezielt auf den Positionen grösster Dehnung, den Membranrändern, angebracht. Höchste Sensitivität von diesen langzeitstabilen Sensoren wird bei Kohlenstoffnanoröhrchen mit kleiner Bandlücke im Bereich des kleinsten Transistorstroms gemessen. Die Sensitivität erreicht Werte von bis zu  $S_0 \sim 0.25 \Delta R/R/\text{bar}$  bei einer Auflösung von mehr als 50 mbar und einem Energieverbrauch von weniger als 40 nW. Abschliessend wird die dielektrophoretis-

che Integration von einzel- und mehrschichtigen Graphenen, zweidimensionalen Kohlenstoffnanostrukturen, demonstriert. Die Ergebnisse dieser Arbeit ermöglichen neue Ansätze für die weitere Elektronik-, Mikro- und Nanosystemminiaturisierung. Kostengünstige lösungsbasierte Prozesse erlauben die Herstellung von Sensoren mit aktiven Elementen bis zu drei Größenordnungen kleiner als der derzeitige Stand der Technik bei gleichzeitig erhöhter Sensitivität und signifikant reduziertem Energieverbrauch.