

Title	グラフェンナノ電子機械（NEM）スイッチングデバイスの研究
Author(s)	王, 文楨
Citation	
Issue Date	2017-06
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/14754
Rights	
Description	Supervisor:水田 博, マテリアルサイエンス研究科, 博士

氏 名	王 文 楨
学 位 の 種 類	博士(マテリアルサイエンス)
学 位 記 番 号	博材第 431 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 29 年 6 月 23 日
論 文 題 目	Graphene-based Nanoelectromechanical(NEM) Switching Devices (グラフェンナノ電子機械 (NEM) スイッチングデバイスの研究)
論 文 審 査 委 員	主査 水田 博 北陸先端科学技術大学院大学 教授 小矢野 幹夫 同 教授 徳光 永輔 同 教授 村田 英幸 同 教授 Moraru Daniel 静岡大学 准教授

論文の内容の要旨

Nanoelectromechanical (NEM) switch has become one of the promising candidates to overcome the limitations of conventional CMOS technology, which can offer extremely low leakage current, abrupt switching ($SS < 3 \text{ mV/dec}$) and high ON/OFF ratio. By taking the advantages of graphene, which are atomic thin and high Young's modulus, we can further reduce the pull-in voltage and scale down the size of graphene NEM switches. An autonomous GNEMS sensor system was proposed by Prof. Hiroshi Mizuta in 2013. Graphene NEM switch is planned to be utilized as a power gating device to shut down the power supply at the sleep-mode of sensor, thus saving the total energy dissipation. Currently, the critical issue, which hinders the development of graphene NEM contact switches, is the device reliability. The irreversible stiction at the contact often occurred, as the most common failure mode of graphene NEM switches. Au-C chemical bonding was recognized, originating from the permanent stiction, which should be excluded from the switch design.

The aim of this study is to achieve stable switching operations of graphene NEM switches. To avoid the direct contact between graphene to metal, naturally grown oxide was selected as the contact material with graphene. The novel graphene contact devices, which combined transmission line method pattern (TLM) pattern with graphene NEM top-gated switches, were fabricated, intended to comprehensively investigate the graphene contact issues. In addition, periodic concave patterns were introduced into the contact interface to reduce the stiction. Static contact between graphene and Cr were studied from the TLM patterns, which indicated slightly negative values of static contact resistance owing to the doping from the metal and the substrate. All the dynamic GNEM contact switches showed clear pull-in operations, however, none of those switches demonstrated the pull-out operations owing to a strong adhesive force. By analysing the measured contact resistance and contact pressure, plastic deformation of the Cr_2O_3 layer was discussed at the graphene- Cr_2O_3 contact interface, which resulted in the increase of vdW force, thus the irreversible

stiction.

To reduce the stiction force, the periodic concave patterns at the bottom surface of the top gate were changed to the tip structures to further reduce the contact area. Besides, comparing with the geometry of GNEM switches studied in dynamic contact, shorter graphene beam length and larger air gap distance from suspended graphene to top gate were applied to the new design, aiming to increase the mechanical restoring force against the adhesive force. Additionally, the thickness of Cr_2O_3 was increased to around 2 nm to avoid the Joule heating due to the tunnelling current. After characterizing the redesigned graphene NEM switches, the hysteresis with clear pull-in and pull-out operations was observed first, but the pull-out operation was not observed in the 2nd cycle and after. We have attributed this phenomenon to the stored charge in the thicker Cr_2O_3 layer, which induced extra stiction force, resulting in the non-volatile operation. Moreover, an unexpected bi-stable NEM switch was realized experimentally by reversing the bias voltage on top electrodes. This was mainly due to the charge injection with opposite polarity to the Cr_2O_3 , canceling the build-up charge in dielectric and further reducing the stiction force. A novel graphene NEM non-volatile logic device was interpreted from the bi-stable switching behaviour, offering the possibility for the instant-off and instant-on applications, further to be applied as a sleep transistor to the system to cut-off the standby energy consumption.

Keywords: NEMS, Graphene, Switch, Contact, Charge storage

論文審査の結果の要旨

グラフェンはその優れた電子輸送特性に加えて、シリコンの10倍以上のヤング率、格子定数の約20%の変形に耐える張り歪耐性、わずかな引張り歪み印加による共振周波数の大きな変調など、シリコン系材料では実現困難な優れた機械的特性を有している。そのため、ナノ電子機械システム(NEMS)に対する新たな材料プラットフォームとして期待され、また従来のバルク半導体と比較して表面積対体積比率が非常に大きいことから、超高感度NEMSセンサーへの応用も大いに期待されている。しかし、その原子層材料という極限性から、従来の半導体MEMS/NEMSと同様に振動子や片持ち梁構造を作製することは容易ではなく、グラフェンNEMS素子に関する実験的報告は世界的にみても極めて限られている。

本研究では、低消費電力・超高感度グラフェンセンサーシステムの開発を最終目的として、その中でセンサー回路と電源の間に挿入して待機時のリーク電流による消費電力(スタンバイ電力)を低減するためのグラフェンNEMスイッチに焦点を絞り、2端子型のグラフェンEMコンタクトスイッチの作製プロセス構築と、その動作特性解析、特にグラフェンとアクチュエーション電極間のコンダクト特性の解明を試みた。まず、シリコン基板上に形成したトレンチ内に金でアクチュエーション電極を形成した後、2層グラフェンを橋渡しした両持ち梁構造で、グラフェン・

金コンタクトスイッチを作製し、約1.8 Vという低電圧での機械的スイッチング特性観測に成功した。しかし、数回のオン・オフ動作（プルイン・プルアウト動作）の後に、炭素と金間に化学的結合が形成されスイッチオフできなくなる永久的Stictionの問題が見つかったため、金／クロム／酸化クロム膜の多層構造を有するアクチュエーション電極をグラフェン梁上部に備えた改良型スイッチを試みた。また、グラフェン－クロム間の静的コンタクト、およびグラフェン－酸化クロム膜のダイナミックコンタクト特性を同時に評価するため、TLMパターンと、NEMSスイッチを集積化したオリジナルのTEG素子を試作・評価した。アクチュエーション電極表面に2次元凸凹アレイ構造を導入することでvdW力によるStictionを低減する試みを行い、グラフェンが2次元孔の内部に局所的にプルインしたと考えられる2次スイッチング現象を観測した。また、グラフェン梁をプルインさせた電圧と逆符号の電圧によってプルアウトする不揮発性スイッチング動作を観測し、その物理的要因としてクロム酸化膜中の電荷トラッピングの可能性を示唆した。

以上、本論文は、これまで実験的に実現が困難であったグラフェンNEMSスイッチの作製と、そのユニークなスイッチング特性を初めて評価することに成功した独創性の高い研究であり、学術上・応用上両方の観点から価値の高いものである。よって博士（マテリアルサイエンス）の学位論文として十分価値あるものと認めた。