

Title	グラフェン-グラフェンナノ電子機械スイッチデバイスの研究
Author(s)	Kulothungan, Jothiramalingam
Citation	
Issue Date	2017-12
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/15079
Rights	
Description	Supervisor:水田 博, マテリアルサイエンス研究科, 博士

氏名	Kulothungan Jothiramalingam		
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 441 号		
学位授与年月日	平成 29 年 12 月 22 日		
論文題目	Graphene-to-graphene Nanoelectromechanical Switching Devices (グラフェン-グラフェン構造を用いたナノ電子機械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
		大島義文	同 准教授
		若林 整	東京工業大学工学院電気電子系 教授

論文の内容の要旨

The Nanoelectromechanical (NEM) contact switches can offer low leakage current, abrupt switching and high ON/OFF ratio. Due to these superior characteristics, NEM contact switch has become one of the demanding candidate to overcome the limitations, such as high off-state power consumption, of conventional CMOS technology. Conventional NEM contact switches exhibit disadvantages such as high pull-in voltage, and interfacial stiction. One of the most promising materials to overcome the demerits of conventional for the NEM contact switch is graphene. Graphene, a single layer of a carbon atom, has excellent electrical and mechanical property. The graphene based NEM contact switches can offer low pull-in voltage switch for ultra-low power application and can also achieve abrupt subthreshold swing ($SS < 60\text{mV/dec}$).

The graphene based NEM contact switch is facing contact adhesion problems as the suspended graphene beam is struck to the metal contact surface (Au, Cr/Cr₂O₃) after the pull-in operation. The gold and the carbon atoms form the chemical bonding, and this leads to the stiction of the graphene in the gold surface. In addition, the amorphous and disordered surface of the Cr/Cr₂O₃ also leads to the highly uncontrolled pull-out operation and subsequently results the stiction of the graphene beam to the surface of Chromium oxide Cr₂O₃ contact.

The aim of this study is to achieve clear pull-in and pull-out operation of the graphene based NEM contact switches. To avoid the direct contact between the graphene to metal, a graphene layer is used as the contact material. The suspended graphene can contact with the contact graphene layer in the pulled-in state. The graphene is used as the anti-stiction material to reduce the stiction.

At first, in order to study the structural dimension graphene NEM contact switches, we conducted the Finite Element Method (FEM) based simulation of doubly clamped graphene based NEM

contact switches. Firstly, we performed the FEM simulation of the switch with dimensions adapted from our earlier experimental device, based on nanocrystalline graphene (NCG). The results obtained in FEM simulations are consistent with the experimental results. Based on this, the FEM simulation for graphene NEM contact switches are carried out. Pull-in and Pull-out characteristics are analyzed for graphene NEM contact switches with different dimensions. This numerical model is used to study the scaling nature of the graphene NEM contact switches. We have found out the structural dimensions to achieve the possibility of sub-5 V and sub-1V graphene NEM contact switches.

We studied the interlayer resistance between the two graphene layers to understand the static graphene-graphene contact characteristics. Incoherent conduction between the graphene layers has been observed. Interlayer tunneling between the two graphene layers is the fundamental conduction mechanism. We have studied the effect of in-situ annealing on the interlayer conduction. The interlayer resistance shows a significant reduction after in-situ annealing. The interlayer resistance values at low temperature (5 K) are 4.8 k Ω and 800 Ω before and after in-situ annealing, respectively. This is attributed to the decrease in the interlayer distance after in-situ annealing.

Finally, we succeeded in demonstrating a graphene-to-graphene NEM contact switch with clear pull-in/pull-out characteristics. We achieved a graphene-to-graphene NEM contact switch with a low pull-in voltage of <1 V, a steep switching slope of <10 mV/dec and a high ON/OFF ratio >10⁵. Owing to the high restoring force of the double-clamped graphene beam, clear pull-out was achieved. And we have demonstrated the switches with more than 15 switching cycles. Due to the smooth atomic-level contact between graphene-graphene layers, these remarkable graphene NEM characteristics were achieved.

Keywords: NEM contact switches, Graphene, Stiction, contact adhesion, Interlayer resistance, Interlayer tunneling, Twisted bilayer graphene, Finite Element Simulation (FEM).

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、現在のCMOSベース集積システムの消費電力低減を目的として、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(GNEM)スイッチに焦点を絞り、新奇な2端子型グラフェン-グラフェン(G-G)型コンタクトスイッチの設計と作製プロセス構築、および、これまでのグラフェン-金属コンタクト型およびグラフェン-絶縁膜コンタクト型スイッチでは実現できなかった急峻なプルアウト動作の実現、さらに動作電圧の低電圧化の実現を試みた。まず、2本のグラフェンナノリボン(GNR)を交差させたクロスコンタクト型GNEMスイッチ構造を考案したが、作製プロセス段階で2本のGNRがファンデルワールス力で付着してしまう問題が生じた。そのため当初目的としていたG-Gダイナミックコンタクト動作は観測できなかったが、この素子のラマン散乱スペクトル解析とGNR間電気抵抗の温度依存性から、2本のGNR間の結晶角のずれと層間距離に関する知見を得た。次に、上部金属電極底面にグラフェンを化学的に接着したグラフェンアクチュエーション電極に、両もち梁型GNRをプルアップさせる改良G-Gスイッチ構造を考案し、急峻なプルイン・プルアウトの繰り返し動作と電流オン・オフ比 $>10^5$ の達成に成功した。さらに、G-G間のエアギャップ距離を28 nmまで短縮した構造を用いて、プルイン電圧 ~ 0.8 Vを達成し、サブ1V動作GNEMスイッチ動作に世界で初めて成功した。

以上、本論文は、これまで急峻で安定したオン・オフ動作実現が困難であったグラフェンNEMSスイッチの開発と、その優れた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る。また集積回路の低消費電力化技術に対するブレークスルーとなる可能性があるなど、学術上・応用上両方の観点から極めて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。