

集積グラフェン NEMS 複合機能素子によるオートノマス・
超高感度センサーの開発

Development of graphene NEMS hybrid functional devices
for autonomous and ultrasensitive integrated sensors

課題番号：25220904

水田 博 (MIZUTA HIROSHI)

北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・教授



研究の概要

原子層材料であるグラフェンの優れた電気的特性と機械的を利用して、グラフェンナノ電子機械システム（NEMS）技術による単一分子検出レベル超高感度環境センサーと、急峻なオン・オフ切り替え性能を持つグラフェン NEMS スイッチを開発し、これらを融合させてオートノマス・極限感度・グラフェン集積センサーシステムの基盤技術を構築する。

研究分野：工学、電気電子工学

キーワード：電子デバイス・集積回路、NEMS、グラフェン、環境センサー

1. 研究開始当初の背景

近年、ナノスケールに微細化された微小電子機械システム（NEMS）の高度機能素子応用が大いに注目されている。RF スイッチなどの研究に加えて、NEMS の表面对体積比が大きいことを利用して、微少な電荷および質量の変化を超高感度で検出する NEMS センサーの研究も盛んになっている。

2. 研究の目的

研究代表者が構築してきた複合 NEMS センサー・パワーマネジメント素子技術と、グラフェン超微細デバイス技術を融合させ、①単一分子レベルの検出感度を有するグラフェン NEMS(GNEMS)環境センサーおよび、②センサー回路と電源間のリーク電流を遮断してシステムの超低消費電力化を図る GNEMS スイッチを開発する。併せて、マルチスケール・GNEMS 集積システムシミュレーション技術と集積化プロセス技術を構築し、オートノマス・極限感度・グラフェン集積センサーシステム基盤技術を開発する。

3. 研究の方法

GNEMS センサーでは吸着分子による電荷移動検出方式をベースに、質量検出方式と吸着分子振動スペクトル検出方式を組み合わせ、超高感度・高選択化を図る。GNEMS スイッチでは、GNEMS-電極界面ファンデルワールス(vdW)力を設計・制御して低電圧動作・高信頼スイッチを開発する。

4. これまでの成果

4.1 グラフェン NEMS 環境センサー

図 1 (a)に示す両持ち梁型 2 層グラフェン梁チャンネルと下部金電極を有する GNEMS 素子を用いて、単一 CO₂分子の吸着・脱離過程の測定に世界で初めて成功した[1]。あらかじめグラフェン梁を下部電極にプルインさせて、引張り応力を印加した斜め梁チャンネルを形成した。測定チャンパー内に導入した非常に希薄 CO₂ガス分子（濃度約 30 ppb）を短時間でグラフェン梁表面に物理吸着させる（図 1 (b)）ため、基板から電界を印加して CO₂分子の吸着を加速する工夫を行った。その結果、グラフェンチャンネルの電気抵抗の時間変化に、単一 CO₂分子の吸着・脱離に伴う

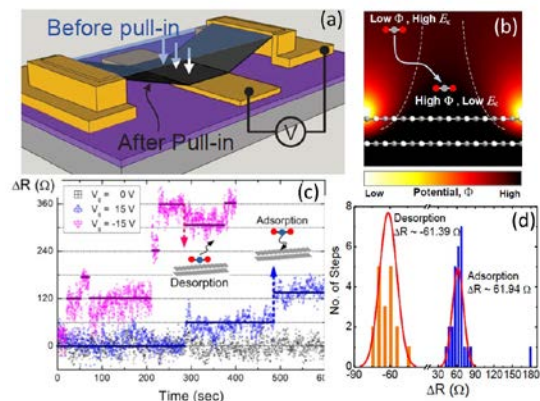


図 1 (a)GNEMS センサー構造, (b)基板電界印加による CO₂ 分子閉込めポテンシャル分布, (c)分子吸着・脱離に伴うチャンネル抵抗時間変化, (d)抵抗変化の統計分布 [1]

量子化した抵抗の増減が観測された（図 1 (c)(d)）。

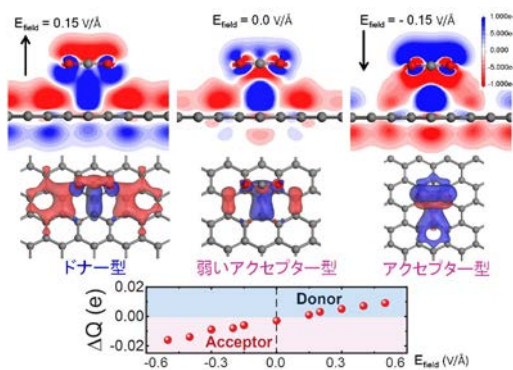


図2 物理吸着したCO₂分子-グラフェン間電荷移動の電界依存性[2]

観測した現象の詳細を解明するため、分子-グラフェン間のファンデルワールス力を取り入れた第一原理シミュレーションを行った結果、外部電界印加時におけるCO₂分子-グラフェン間の電荷移動と(図2)、CO₂分子内に生ずる微小分極ともなうチャネル内キャリアのリモートクーロン散乱による抵抗変化が、観測された量子化抵抗変化値と良く一致することを見出した[1][2]。

4.2 グラフェン NEMS スイッチ

GNEMS 集積センサーシステムのパワーマネジメント素子として、GNEMS スイッチの開発も並行して進めている。最初に、2層グラフェン両持ち梁の下部に金の制御電極を有する2端子型GNEMSスイッチ(図3)を作製し、下部制御電極への印加電圧わずか1.8 Vでグラフェン両持ち梁をプルイン動作することに成功した[4]。このスイッチング電圧値は、従来の薄層SOI膜を用いたシリコンNEMSスイッチに比べて約1/20の低電圧化を実現している。また、制御電極をグラフェン梁上部に備え、その下面を自然酸化膜としたグラフェン-絶縁膜コンタクト型GNEMSスイッチを開発し、数百回のオン・オフ繰り返しが可能であることを観測した。

5. 今後の計画

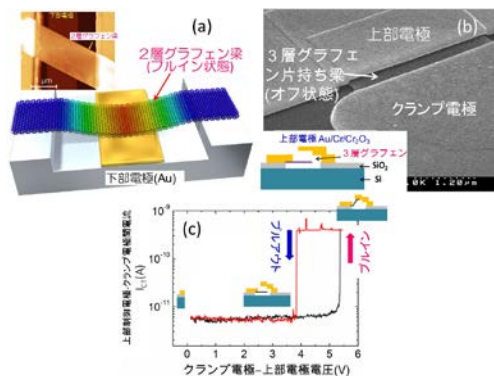


図3 (a) 2層両持ち梁型[4]、および(b) 3層片持ち梁型GNEMSスイッチと、(c) そのスイッチング特性

これまでの研究成果である①電荷移動検出方式GNEMSセンサーでの単一分子検出成功、②超低電圧動作GNEMSスイッチをベースとして、より高精度・高性能・低消費電力のGNEMSセンサーシステム実現に向けて研究を推進する。センシングの対象とする環境ガス種としては、CO₂、NH₃などの基本ガスに加えて、シックハウス症候群の原因となる揮発性有機化合物(VOC)ガスを取り上げ、WHOが定めているppb一桁台の検出限界濃度での検出を目指す。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- [1] J. Sun, M. Muruganathan, and H. Mizuta, 'Room Temperature Detection of Individual Molecular Physisorption using Suspended Bilayer Graphene', in press for *Science Advances*, DOI: 10.1126/sciadv.1501518 (2016)
- [2] J. Sun, M. E. Schmidt, H. M. H. Chong, M. Muruganathan, and H. Mizuta, 'Large-Scale Nanoelectromechanical Switches Based on Directly Deposited Nanocrystalline Graphene on Insulating Substrates', *Nanoscale* **8**, 6659-6665 (2016)
- [3] M. Muruganathan, J. Sun, T. Imamura and H. Mizuta, 'Electrically Tunable van der Waals Interaction in Graphene-Molecule Complex', *NANO Letters* **15**, 8176-8180 (2015)
- [4] T. Iwasaki, J. Sun, N. Kanetake, T. Chikuba, M. Akabori, M. Muruganathan and H. Mizuta, 'Hydrogen intercalation: an approach to eliminate silicon dioxide substrate doping to graphene', *Applied Physics Express* **8** 015101 (4 pages) (2015)
- [5] J. Sun, W. Wang, M. Muruganathan and H. Mizuta, 'Low pull-in voltage graphene electromechanical switch fabricated with a polymer sacrificial layer', *Appl. Phys. Lett.* **105**, 033103 (4 pages) (2014)
- [6] S. Hang, Z. Moktadir and H. Mizuta, 'Raman study of damage extent in graphene nanostructures carved by high energy ion beam', *Carbon* **72**, 233-241 (2014)

ホームページ等

<http://www.jaist.ac.jp/ms/labs/mizuta-lab/index.html>