

# MoS<sub>2</sub>とグラフェンの積層によるナノ電気機械共振器の熱膨張の抑制

## Suppression of thermal expansion of nano-electro-mechanical resonator

by stacking MoS<sub>2</sub> and graphene

阪府大工, °井上 太一, 望月 裕太, 竹井 邦晴, 有江 隆之, 秋田 成司

Osaka Pref. Univ., °Taichi Inoue, Yuta Mochizuki, Kuniharu Takei, Takayuki Arie, Seiji Akita

E-mail: t\_inoue-4@pe.osakafu-u.ac.jp

はじめに 原子膜を用いた電気機械共振器は、共振周波数の高さや制御性から高感度力センサや発振器への応用が期待できる。しかし熱に敏感[1]なため温度変化による周波数シフトが課題である。そこでひずみ[2]や欠陥[3]による熱膨張の抑制が検討されているが、これらは精密な制御が必要で共振特性や制御性の悪化が懸念される。本研究では正負逆の熱膨張係数(TEC)を持つグラフェンと MoS<sub>2</sub> の積層により熱膨張を相殺し、共振周波数の温度依存性が小さい電気機械共振器を実現している。

**実験** 共振部分が FET チャンネルとなるグラフェン・積層 MoS<sub>2</sub>/グラフェン電気機械共振器を作製し、10<sup>-3</sup> Pa 以下の真空下で共振周波数シフトの温度依存性を測定した(図 1(a))[4]。FET に高周波 V<sub>ds</sub> を印加し、基板-共振器間に生じる静電気力により振動させた。振動の検出は低周波(f<sub>mod</sub>=1 kHz)の AM 変調を V<sub>ds</sub> に加え、振動による出力電流値の変化をロックインアンプで読み取った。また直流電圧 V<sub>gs</sub> により静電気力を誘起でき、共振器に張力を加え共振周波数 f<sub>0</sub> の制御が可能である(図 1(b))。

**結果と検討** 図 1(c)に室温から 10 K 温度上昇させたときの、各 V<sub>gs</sub> におけるグラフェンと積層 MoS<sub>2</sub>/グラフェン電気機械共振器の周波数シフト(Shift/dT (%/K))を示す。グラフェンの場合、V<sub>gs</sub> の増加に伴いシフトが正から負へと遷移した。これはこれまで報告されている通り、V<sub>gs</sub> 印加によるひずみに起因した挙動[2]である。V<sub>gs</sub> = 4.5 V では Shift/dT ≃ -0.1 %/K とシフトが抑えられているが、V<sub>gs</sub> を固定するため周波数制御が制限される。一方積層の場合、各 V<sub>gs</sub> で Shift/dT ≃ 0.15~0.25 %/K であり周波数の制御性を保ちつつシフトが抑制された。ここで MoS<sub>2</sub> やグラフェンに加え、基板も含めた共振器の熱膨張を考慮した振動モデルから全体の TEC を求めた。グラフェンの場合 TEC は約-1.6×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> であり、先行研究(-7×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>[2])に近い値が得られた。積層の場合 TEC は約-5.9×10<sup>-7</sup> K<sup>-1</sup> であり、正負が異なる原子膜の積層という簡便な手法で共振器の TEC が約 1/3 まで減少した。この積層により、周波数の制御性や温度変化への安定性を備えたナノ電気機械共振器として更なる応用展開が期待できる。

**謝辞** 本研究は科学研究費補助金で行われた。

**文献**[1] T. Inoue *et al.*, *ACS omega* **2**, 5792 (2017) [2] V. Singh *et al.*, *Nanotechnology* **21**, 209801 (2010)

[3] G. López-Polín *et al.*, *Carbon* **116**, 670 (2017) [4] T. Inoue *et al.*, *arXiv*, 1805.03835 (2018)

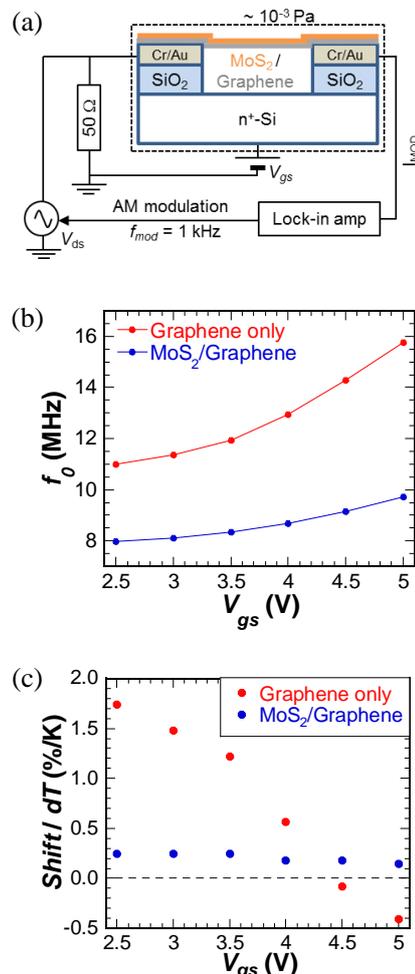


Fig. 1 (a) Measurement setup. (b) Tuning of resonance frequency by V<sub>gs</sub>. (c) V<sub>gs</sub> dependence of the temperature coefficients of the resonance frequency shift for graphene and MoS<sub>2</sub>/graphene electro-mechanical resonator.