原子膜の積層によるナノ機械共振器の振動制御

Resonance control of nano mechanical resonator by stacking atomic layers

大阪府大工，°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　力センサや発振器等への応用に期待できる原子膜ナノ機械共振器において、その振動制御が検討されてきた[1]。しかし多くは単一の原子膜を用いるにとどまり振動の制御方法が制限されている。本研究ではグラフェンと MoS_2 の積層を用いてナノ機械共振器の振動制御を検討した。ここでグラフェンと MoS_2 で熱膨張係数(TEC)の正負が異なり熱膨張が相殺されるため、共振周波数が温度変化に対して安定する。ひずみ[2]や欠陥[3]による熱膨張の抑制手法と比べ、積層によるアプローチは特性や制御性の悪化が懸念されず簡便な手法である。

実験　積層 MoS_2/グラフェン機械共振器(図 1(a))を作製し、真空下で共振測定をした(図 1(b))[4]。架橋部に高周波電圧 V_{ds} 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。低周波(f_{mod}=1 kHz)の AM 変調を V_{ds} に加え、振動した際の出力電流値の変化をロックインアンプで検出した。またゲート電圧 V_{gs} によって静電気力を誘起し、共振器に張力を加え共振周波数の制御ができる。

結果と検討　グラフェンと MoS_2/グラフェン機械共振器において、室温から 10 K 温度上昇させたときの各 V_{gs} における共振周波数シフト(*Shift/dT* (%/K))を測定した(図 1(c))。グラフェン単層の場合では、V_{gs} が増加するにつれシフトが正から負へと変化しているが、これは先行研究と同様にひずみに起因した挙動[2]である。ひずみにより V_{gs} =4.5 V ではシフトが抑えられているが、V_{gs} を固定するため周波数の制御性を失ってしまう。一方積層の場合、各 V_{gs} で *Shift/dT* ≒0.15~0.25 %/K とシフトを抑制しつつ周波数の制御性を確保できた。ここで MoS_2・グラフェン・基板も含めた共振器全体の TEC を共振モデルから算出した。グラフェンの場合 TEC は約-1.6×10^{-6} K^{-1} であり、先行研究(-7×10^{-6} K^{-1}[2])に近い値が得られた。積層の場合 TEC は約-0.59×10^{-6} K^{-1} であり、TEC の正負が異なる原子膜の積層という簡便な手法で TEC を約 1/3 まで減少させることに成功した。

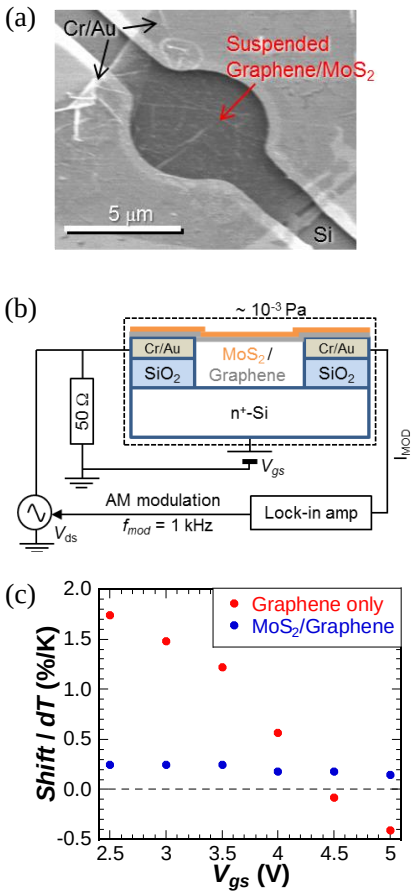

Fig. 1 (a) SEM image of stacked MoS_2/graphene mechanical resonator. (b) Tuning of resonance frequency by V_{gs}. (c) V_{gs} dependence of the temperature coefficients of the resonance frequency shift for graphene and MoS_2/graphene electro-mechanical resonator.

今後の展望　本研究では積層による機械・熱的特性の変調に着目したが、今後は電気・光特性にも着目しナノ機械共振器の振動制御の拡張を目指す。また他の二次元材料(h-BN、WS_2 等)を組み合わせた新規ナノ機械共振器の作製や共振特性の評価にも取り組む。

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.*, *2D Materials*, **5**, 045022 (2018)

© 2019年 応用物理学会