

令和 5 年 4 月 19 日

公益信託 NEXCO関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金
受託者 三菱UFJ信託銀行株式会社 御中

研究概要書

研究課題：高速道路の低周波振動に適応可能な SnS ナノ振動発電素子の特性向上

研究代表者：東京大学工学系研究科 教授 長汐 晃輔

はじめに

高速道路での地震・事故等の回避を目指したセンサシステムや、自動車事故低減のためのタイヤ空気圧センサー等において、振動のエネルギーを利用した環境発電デバイスによる自立電源化は急務である。本研究では、PZTを超える発電特性が期待できる新規圧電材料SnSにおいて圧電/強誘電特性を世界で初めて実験的に実証したが、理論的に予想されるほど優れた発電特性は得られていない。本研究では、振動発電特性を向上のため、結晶成長に立ち返りSnSの面外方向の分極方向を完全に揃えることに成功した。

1. 研究の目的

高速道路での地震・事故等の回避を目指したセンサシステムや、自動車事故低減のためのタイヤ空気圧センサー等において、振動のエネルギーを利用した環境発電デバイスによる自立電源化は急務である。我々は、PZTセラミクスを凌ぐ圧電特性を有する新規材料であることが理論的に予測[1]されていた2次元系材料であるSnSを成長させ、圧電/強誘電特性を世界で初めて実験的に実証[2]し、昨年のNEXCO助成により高速道路での数Hz程度の低周波数振動の歪印加装置を開発しSnSの振動発電の実証に成功した。しかしながら、理論的に予想されるほど優れた発電特性は得られていない。圧電特性を示す非点対称構造は2次元層状物質のSnSにおいて、5層、3層、単層のように奇数層のみであり、層数減少により圧電係数が増加する。逆に層数が増加しバルクになると非点対称性を消失する。応用展開への壁は、圧電による発電はバルク特性であるため単層厚さだと得られる電流が小さく、バルクだと非点対称性が無く圧電が現れないことである。本研究では、単原子厚さ(0.335nm)のステップが大量に存在するグラファイト基板(HOPG)を用いて成長を行うことでスパイラル成長を誘起し、分極方向をすべて揃えることを試みた。

2. スパイラル成長による面外方向に対して分極方向の揃ったバルク SnS 成長

図1に原子レベルで平坦なmica基板上及び、単原子厚さのステップ/テラス構造をもつHOPG(グラファイト)基板上に成長させたSnSのAFM写真を示す。mica上では、SnSのエッジのみで成長し、ベール面上で新たな核生成を必要とする2次元核生成成長しており、HOPG上ではステップ直上に形成されたらせん転位を起点としたスパイラル成長している様子が見て取れる。SnS1層は2原子高さのため、単層(及び2層)グラフェンのステップを乗り越えることが可能であったが、3層グラフェンステップは乗り越えられず螺旋転位は形成されなかった点は興味深い。

ここで、スパイラル成長により得られたSnS結晶において非点対称性を有し分極が揃っていることを確かめるために、900nmの励起光波長による顕微第二高調波発生(SHG)分光測定を行った。図2に示すように、mica上のSnSでは450nmのSHG発光が観測されず、HOPG上のSnSでは明確にSHGピークが観察された。また、断面HAADF-STEM観察による結晶構造解析から、バルクで分極が揃った結晶

を作製できたことが分かった。以上より、HOPG 上の SnS においては、スパイラル成長により面外方向の分極の揃った SnS 成長していると言える。本手法を利用し、アモルファス SiO₂/Si 基板上に単層グラフェンを転写し、SnS 成長を行ったところ、グラフェンエッジから SnS がスパイラル成長する様子を観測した。これにより「位置」及び「方向」が厳密に制御され、分極がすべて揃ったバルク SnS 成長が可能となる。また最近、圧電応答顕微鏡 (PFM) の面内方向測定による SnS の面内分極ドメイン観察にも成功している。本研究は今後の振動発電特性評価に繋がる結果である。

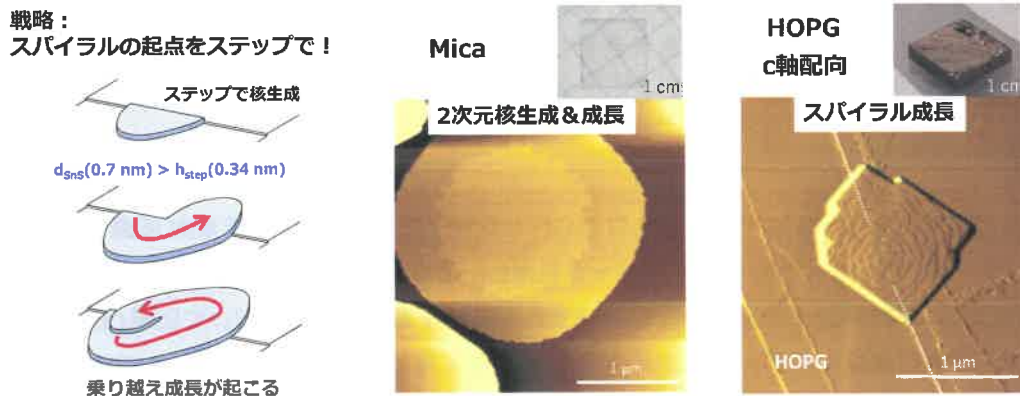


図1 mica 基板上及び HOPG 基板上に成長した SnS の AFM 像。

3. まとめ

本研究では、0.335nmの単原子厚さのステップが大量に存在するHOPG基板を用いて成長を行うことでスパイラル成長を誘起し、SnSの面外方向の分極をすべて揃えることに成功した。また、任意基板上にグラフェンを転写することで疑似的原子ステップを導入しスパイラル成長を誘起した。「位置」及び「方向」の厳密制御の可能性を示した。これにより振動発電特性の向上が期待できる。

● 研究成果（謝辞記載投稿論文）

- [1] Y.-R. Chang, T. Nishimura, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, **ACS Appl. Mater. Interfaces.**, 2022, 14, 17, 19928–19937.
- [2] T. Sasaki, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Nishimura, K. Nagashio, **ACS Appl. Mater. Interfaces.**, 2022, 14, 22, 25659–25669.
- [3] W. Nishiyama, T. Nishimura, M. Nishioka, K. Ueno, S. Iwamoto, K. Nagashio, **Adv. Photonics Res.**, 2022, 3, 2200231.
- [4] Y.-R. Chang, R. Nanae, S. Kitamura, T. Nishimura, H. Wang, Y. Xiang, K. Shinokita, K. Matsuda, T. Taniguchi, K. Watanabe, and K. Nagashio, **Adv. Mater.** (in revision).

参考文献

- [1] R. Fei, W. Li, L. Yang, **Appl. Phys. Lett.**, 2015, 107, 173104.
- [2] N. Higashitarumizu, H. Kawamoto, C.-J. Lee, B.-H. Lin, F.-H. Chu, I. Yonemori, T. Nishimura, K. Wakabayashi, W.-H. Chang, K. Nagashio, **Nature commun.**, 2020, 11, 2428.

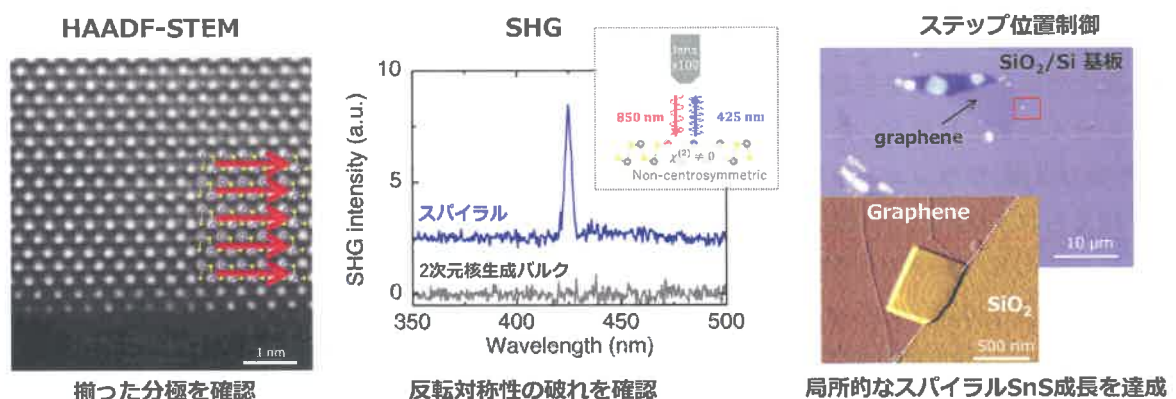


図2 mica 基板上でスパイラル成長した SnS の断面 HAADF-STEM 像と SHG 及び位置制御。