

若林 整

東京工業大学工学院
教授

二次元 TMDC 相補型 MISFETs の LSI プロセスによる性能向上と応用

§ 1. 研究実施体制

(1)「すずかけ台」グループ

- ① 研究代表者:若林 整 (東京工業大学工学院、教授)
- ② 研究項目
 - ・TMDC 研究統括

(2)「大岡山」グループ

- ① 主たる共同研究者:川那子 高暢 (東京工業大学科学技術創成研究院、助教)
- ② 研究項目
 - ・TMDC デバイス評価・設計

(3)「US」グループ

- ① 主たる共同研究者:Kaustav Banerjee (University of California, Santa Barbara, Electrical and Computer Engineering, Professor)
- ② 研究項目
 - ・TMDC device modeling

(4)「生田」グループ

- ① 主たる共同研究者:小椋 厚志 (明治大学理工学部、教授)
- ② 研究項目
 - ・TMDC 膜評価および CVD

§2. 研究実施の概要

二次元 Transition-Metal Dichalcogenide (TMDC)相補型 MISFETs の LSI プロセスによる性能向上と応用に向けて、すずかけ台 G はスパッタ法による TMDC 成膜とデバイス化に取り組んでいる。特に H29 年度は、400°C 高温 UHV-RF マグネトロンスパッタと H₂S/Ar ガス中 400°C 硫化熱処理により形成した原子層状 MoS₂ 膜をチャネルとした TiN トップゲート nMISFET 動作に成功した。TiN ソース・ド

レイン電極形成後に MoS₂ 成膜に続けて Al₂O₃ 膜で表面を保護することと、活性領域パターンニング後に MoS₂ 側壁を再度 Al₂O₃ 膜で保護した。ノーマリーオン動作で、移動度は約 0.1 cm²/V-s と低いものの貴重な成果だと考えられる。さらに MoS₂ 膜結晶性向上のため、気相硫黄により硫化を行った。上図の通り、700°C の高温ではあるが、比較的低いキャリア濃度 2 × 10¹⁶ cm⁻³ と高移動度 25 cm²/V-s が得られた[1]。

また大岡山 G は TMDC デバイス評価・設計に取り組んでいる。特に H29 年度は、HfN ボトムゲート電極上に HfO₂ 膜を形成し、さらにその上に n-Octa-Decyl-Phosphonic Acid (ODPA) による自己組織化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer: SAM) 絶縁膜を形成した。さらに Poly Dimethyl-Siloxane (PDMS) 弾性膜を用いて MoS₂ 膜を転写することで、理想的にダングリングボンドが存在しない絶縁膜と半導体の界面準位密度が低い nMOSFET を実現し、絶縁膜とチャネル膜が厚くても比較的低い S 値 75 mV/dec. を達成した[2]。

さらに US G は TMDC device modeling に取り組んでいる。特に H29 年度は、各グループの材料特性や電気特性の向上に関するコンサルティングを通じて研究推進に貢献した。

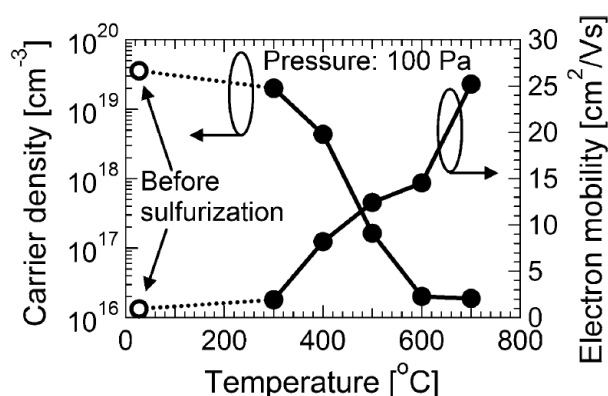
次に生田 G は TMDC 膜評価および CVD による TMDC 成膜に取り組んでいる。特に H29 年度は、共スパッタ法により MoS₂/MoTe₂ を成膜し、CVD 要素技術としてバブリングで輸送した有機プリカーサ (i-C₃H₇)₂Te 中で 600°C 熱処理によりテルル化し、バンドギャップ制御を実証した[3]。

H29 年度の代表的な原著論文

[1] Kentaro Matsuura, Takumi Ohashi, Iriya Muneta, Seiya Ishihara, Kuniyuki Kakushima, Kazuo Tsutsui, Atsushi Ogura, Hitoshi Wakabayashi, "Low-Carrier-Density Sputtered MoS₂ Film by Vapor-Phase Sulfurization," Journal of Electronic Materials (2018).

[2] Takamasa Kawanago, Ryo Ikoma, Tomoaki Oba, and Hiroyuki Takagi, "Fabrication of hybrid self-assembled monolayer/hafnium oxide gate dielectric by radical oxidation for molybdenum disulfide field-effect transistors", Appl. Phys. Lett. 111, 202904 (2017).

[3] Yusuke Hibino, Seiya Ishihara, Naomi Sawamoto, Takumi Ohashi, Kentarou



図：ホール効果測定よりキャリア濃度と電子移動度の気相硫黄硫化熱処理温度依存性. 比較的 low-carrier 濃度 2 × 10¹⁶ cm⁻³ と高移動度 25 cm²/V-s が得られた。

Matsuura, Hideaki Machida, Hitoshi Wakabayashi and Atsushi Ogura, "Band gap-tuned $\text{MoS}_{2(1-x)}\text{Te}_{2x}$ thin films synthesized by a hybrid Co-sputtering and post-deposition tellurization annealing process", *Journal of Materials Research*, vol. 32, Issue 16, pp.3021-3028, 2017.