

MoS₂ FET から 10 年：何が解決して何が未解決なのか？

10 years from MoS₂ FET: What has been resolved and what is unresolved?

東大マテリアル 長汐晃輔

Univ. of Tokyo, K. Nagashio

E-mail: nagashio@material.t.u-tokyo.ac.jp

2011 年に EPFL の Kis らによる HfO₂ トップゲート単層 MoS₂ FET の報告からすでに約 10 年が経過した。結合の閉じたダングリングボンドの無い CNT・グラフェンに対する理解の積み上げにより現在の 2D デバイスの基礎が形成され、2020 年に発表した imec のロードマップにおいて 1 nm プロセス以降への適応が真剣に検討されるに至っている点は特筆すべきである。

表 1 は、「成長」から「集積化」まで大きなブレイクスルーだと個人的に感じている論文を抽出したものである。成長に関しては、100%のカバレッジにおける粒径(<1 μm)及び結晶性にまだ課題が残るものの MOCVD による 4 インチサイズの大面積化は産業応用上の鍵となる結果である。それ故、2D 材料特有のウエハースケールでの転写技術の確立は重要な技術課題の一つである。単一トランジスタにおける要素技術を見た場合、一番のボトルネックはドーピング技術が未確立である点である。最近になり成長中及び成長後の置換型ドーピングに関する結果が報告されてきているものの依然として研究段階である。このため、すでに急峻なスイッチング特性と高いオン電流特性を示す WS₂ や MoS₂ の N 型 FET が多数報告されている一方で、P 型に関しては低い特性に留まっているのが現状である。集積化に関して、2020 年に 54,640 個の FET により inverter, NAND, SRAM, リングオシレータ等のロジック回路が報告されたが、N 型 FET のディプレッションモードとエンハンスメントモードにより形成したインバータを利用しており、P/N を作り分け集積化されたものは報告されていない。今後の更なる展開には、ドーピング及び金属/2D のショットキー界面制御による P 型 FET の確立が最重要課題である。

本講演では、2D デバイスにおける我々の取り組みを紹介しつつ、将来展望を議論したい。

表 1. 「成長」から「集積化」におけるブレイクするとなったと研究。

					Achieved	Challenges
Growth	2012 CVD growth on SiO ₂ Adv. Mater. 2012, 24, 2320.	2015 Epitaxial CVD growth on Al ₂ O ₃ ACS Nano 2015, 9, 4, 4611.	2015 MOCVD growth on SiO ₂ /quartz Nature 2015, 520, 656.	2021 1L Epitaxial Growth & Device on Al ₂ O ₃ Nature nano. 2021, 16, 1201.	<ul style="list-style-type: none"> Wafer scale 1L growth Gran boundary connection by epitaxial growth 	<ul style="list-style-type: none"> Low temperature growth Transfer process
Doping	1980s Substitutional doping during CVT		2020 Substitutional doping during MOCVD Nano lett. 2020, 20, 4095.	2021 Post doping by dopant beam ACS Nano 2021, 15, 19225	<ul style="list-style-type: none"> Substitutional doping during/after growth Understanding of no applicability of ion implantation to 2D 	<ul style="list-style-type: none"> Crystallinity Find best dopant
Gate stack	2011 HfO ₂ -MoS ₂ FET Nature nano. 2011, 6, 147.		2019 Full energy spectra of D _{it} at Al ₂ O ₃ /MoS ₂ Adv. Func. Mater. 2019, 29, 1904465.	2019 EOT = 1nm (HfO ₂ /organic monolayer) on MoS ₂ Nature electronics 2019, 2, 563.	<ul style="list-style-type: none"> EOT = 1 nm D_{it} < 10¹² cm⁻²eV⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> further EOT reduction Reliability
Contact	2013 Indicating FLP at metal/MoS ₂ Nano lett. 2013, 13, 100.	2013 Edge contact to graphene Science 2013, 342, 614.	2018 FLP free metal/2D contact Nature 2018, 557, 696.	2019 vdW metal contact (In) Nature 2019, 568, 70.	<ul style="list-style-type: none"> Reduction of R_c (< 1 kΩμm) 	<ul style="list-style-type: none"> Further reduction of R_c p-type contact
Other aspects		2016 L _{ch} = 3.9 nm FET Science 2016, 354, 6308.	2020 FINFET structure Nature commun. 2020, 11, 1205.	2021 2D Nanosheet structure Adv. Mater. 2021, 33, 2102201.	<ul style="list-style-type: none"> Demonstration of immunity against SCE 	<ul style="list-style-type: none"> 2D nanosheet structure with high-k oxide
Integration	2012 Integrated circuits: 12 FETs (inverter, NAND, SRAM etc) Nano lett. 2012, 12, 4674.	2017 Microprocessor: 115 FETs Nature commun. 2017, 8, 14948.	2020 Integrated circuits: 54640 FETs (inverter, NAND, SRAM etc) Nature electronics 2020, 3, 711.			<ul style="list-style-type: none"> 2D CMOS using P&N FETs