

Symposium (Oral) | Symposium : 2D materials and their integrated circuit and electronic device applications

📅 Wed. Sep 18, 2024 1:30 PM - 5:15 PM JST | Wed. Sep 18, 2024 4:30 AM - 8:15 AM UTC 🏨 C42 (Hotel Nikko 4F)

[18p-C42-1~7] 2D materials and their integrated circuit and electronic device applications

Yukiko Takamura(JAIST), Akinobu Teramoto(Hiroshima Univ.)

Symposium Sponsor

 Oxford Instruments

1:30 PM - 2:00 PM JST | 4:30 AM - 5:00 AM UTC

[18p-C42-1]

2D Material and Device Technologies for 3D-Stacked FET

○Hitoshi Wakabayashi¹ (1.IIR, Tokyo Tech)

2:00 PM - 2:30 PM JST | 5:00 AM - 5:30 AM UTC

[18p-C42-2]

Toward wafer-scale integrated circuit technology using two-dimensional materials

○Kosuke Nagashio¹ (1.UTokyo)

🎯 English Presentation 🎯 Highlighted Presentation

2:30 PM - 3:00 PM JST | 5:30 AM - 6:00 AM UTC

[18p-C42-3]

Possible applications of 2D material devices and related integration challenges

○Tom Schram¹ (1.imec)

3:15 PM - 3:45 PM JST | 6:15 AM - 6:45 AM UTC

[18p-C42-4]

TMD Film Deposition using Novel Metal-organic Precursors

○Atsushi Ogura^{1,2}, Hideaki Machida³ (1.Meiji Univ., 2.Meiji Renewable Energy Laboratory, 3.Gas-phase Growth Ltd.)

3:45 PM - 4:15 PM JST | 6:45 AM - 7:15 AM UTC

[18p-C42-5]

Two-dimensional-heterostructures for functional quantum materials

○Ryo Kitaura¹ (1.NIMS)

4:15 PM - 4:45 PM JST | 7:15 AM - 7:45 AM UTC

[18p-C42-6]

Fabrication and applications of van der Waals junctions of 2D materials

○Tomoki Machida¹ (1.IIS, Univ. of Tokyo)

4:45 PM - 5:15 PM JST | 7:45 AM - 8:15 AM UTC

[18p-C42-7]

Photochromic Molecule in Solution Combined with 2D Material FET for Optical Device

○Tadahiro Komeda Komeda¹, Tsuyoshi Takaoka¹ (1.IMRAM, Tohoku Univ.)

3D-Stacked FET 向け 2D 材料・デバイス技術

2D Material and Device Technologies for 3D-Stacked FET

東京工業大学 ○ 若林 整 ; ○ Hitoshi Wakabayashi, Tokyo Institute of Technology

E-mail: wakabayashi.h.ab[at]m.titech.ac.jp

半導体集積回路産業は、Moore's law [1] を目標とした Scaling concept [2] に従った微細化により [3]、高速化や低消費電力化、低コスト化、高集積化を実現している。特に近年では、Fin-FET 技術による特性ばらつき抑制により、低消費電力化や低コスト化、高集積化が進んでいる [4]。さらに一部で Gate-All-Around Nano-Sheet FET (GAA-NS-FET) により、ノンドープチャネル膜厚のばらつきを低減することで低消費電力化や低コスト化、高集積化が進んでいる [5, 6]。次に、さらなる低消費電力化や低コスト化、高集積化に向けて、Complementary FET (CFET) 或いは 3D-Stacked FET (3DSFET) が開発されている [7-10]。しかし、CFET や 3DSFET では膜厚ばらつきを低減できないため、原子層状半導体膜、例えば遷移金属ダイカルコゲナイド (Transition-metal di-chalcogenide: TMDC) 膜 [11] を用いた 2D 薄膜半導体を用いた 3DSFET が研究され、さらに移動度向上によるエネルギー遅延積低減 [12] も研究されている。

そこで本稿では材料・デバイス技術として、まず TMDC 膜について、移動度向上のためにチャネル濃度を低減する必要があり、スパッタ膜により 10^{-14} cm^{-3} 程度まで低減できている [13-21]。またスパッタ TMDC 膜の膜厚ばらつき抑制は比較的小さく、 ZrS_2 膜等は移動度も高い [22-24]。次に、3DSFET の特有のプロセスとして、Sacrificial layer あるいは Supporting layer 上への TMDC 成膜がある [25]。そこで MoS_2 膜について、例えば、plasma SiO_2 膜上 PVD- MoS_2 膜の膜質が良好であることを確認した [26]。さらに、ハロゲンのドーピングやカルコゲナイドの欠損などにより低抵抗化することや [27-29]、nFET には仕事関数が小さいコンタクト材料 [30, 31]、pFET には仕事関数が大きいコンタクト材料 [32] により高性能化できることが分かっている。以上の通り、2D 材料・デバイス技

術の研究開発が進められているが、Integration の観点では研究課題が山積みである。

謝辞：本研究の一部は文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 (JPS011438) 及び JSPS 科研費 (20H05880) の助成を受けた。

参考文献

- [1] Gordon E. Moore, *Electronics*, **38**, No. 8, p. 114, 1965.
- [2] Robert H. Dennard, *et al.*, *IEEE J. Solid-State Circuits*, **SC-9**, p. 256, 1974.
- [3] Hitoshi Wakabayashi, *et al.*, *IEEE T-ED*, v53, i9, p. 1961, 2006.
- [4] Shien-Yang Wu, *et al.*, *IEEE/IEDM*, 27.5, 2022.
- [5] E.-J. Yoon, *et al.*, *IEDM*, 27.1, 2004.
- [6] Jaehun Jeong, *et al.*, *Symp. on VLSI Tech. and Circuits*, T1-2, 2023.
- [7] Eisuke Anju, *et al.*, *IEEE/J-EDS*, p. 1239, **6**, 2018.
- [8] Marko Radosavljević, *et al.*, *IEDM*, 29-2, 2023.
- [9] Jaehyun Park, *et al.*, *IEDM*, 29-4, 2023.
- [10] S. Liao, *et al.*, in *IEEE/IEDM*, 29-6, 2023.
- [11] B. Radisavljevic, *et al.*, *Nature Nanotech*, **6**, pp. 147-150, 2011.
- [12] H. Wakabayashi, *et al.*, *EDTM*, 4D-1, 2024.
- [13] Takumi Ohashi, *et al.*, *JJAP*, **54**, 04DN08, 2015.
- [14] Shinya Imai, *et al.*, *JJAP*, **60**, SBBH10, 2021.
- [15] Ryo Ono, *et al.*, *JJAP*, **61**, SC1023, 2022.
- [16] Jun'ichi Shimizu, *et al.*, *JJAP*, **56**, 04CP06, 2017.
- [17] Kentaro Matsuura, *et al.*, *J.*, *Electrical Materials*, Vol. 47, No. 7, p. 3497, (2018).
- [18] Takuya Hamada, *et al.*, *J-EDS*, v9, p. 1117, 2021.
- [19] Haruki Tanigawa, *et al.*, *JJAP*, **59**, SMMC01, 2020.
- [20] Kentaro Matsuura, *et al.*, *JJAP*, **59**, 080906, 2020.
- [21] Shinya Imai, *et al.*, in *44th International Symposium on Dry Process (DPS2023)*, D-4, 2023.
- [22] M. Hamada, *et al.*, *IEEE/J-EDS*, **7**, 1258, 2019.
- [23] Masaya Hamada, *et al.*, *JJAP*, **60**, SBBH05, 2021.
- [24] Masaki Otomo, *et al.*, *JJAP*, **62**, SC1015, 2023.
- [25] Yun-Yan Chung, *et al.*, *IEEE/IEDM*, 2-1, 2023.
- [26] N. Matsunaga, *et al.*, *IEEE/EDTM*, 2J-4, 2024.
- [27] Takuya Hamada, *et al.*, *IEEE/J-EDS*, 2021.
- [28] Taiga Horiguchi, *et al.*, *JJAP*, **61**, 075506, 2022.
- [29] Keita Kurohara, *et al.*, *J-EDS*, p. 390, **12**, 2024.
- [30] Satoshi Igarashi, *et al.*, *JJAP*, **60**, SBBH04, 2021.
- [31] Shinya Imai, *et al.*, *IEEE/EDTM*, 4D-4, 2024.
- [32] Ryosuke Kajikawa, *et al.*, *SSDM*, A-2-03, 2023.

2次元材料のウエハスケール集積回路技術の基盤構築に向けて

Toward wafer-scale integrated circuit technology using two-dimensional materials

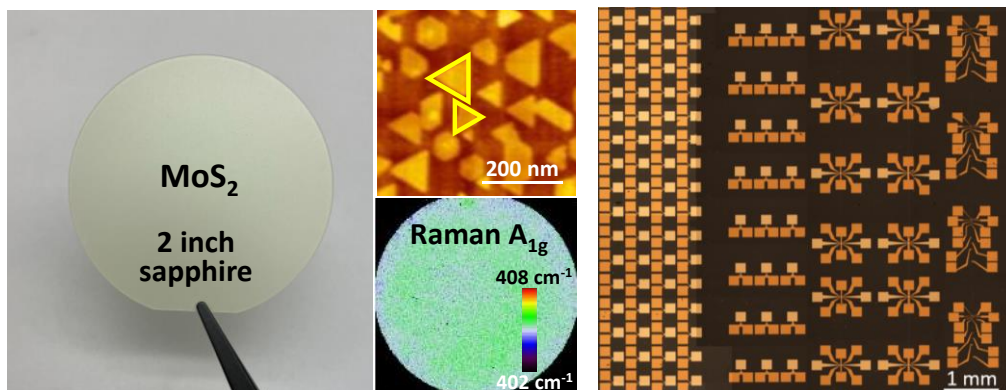
東大マテリアル 長汐晃輔

Univ. of Tokyo, K. Nagashio

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

2次元材料は、(i)ダングリングボンドの無い表面構造のため単層厚さで Si よりも高い移動度を維持できること、(ii)原子層厚さのため短チャネル耐性に強いこと、(iii)厚さに起因したチャネル容量を無視できることによるオン電流向上等の実証により Si-MOSFET に対する優位性は既に広く理解されている。しかしながら、自身を含めこれらの研究報告は、全て単一デバイスにおいてなされたものであり、2次元材料の本格的な集積化につながる基礎的な研究開発は限定的である。これは、最先端ロジックにおける最終到達のデバイス構造は PMOS ナノシート上に NMOS ナノシートを3次元配置する「CFET」であるが、チャネルの物理長が 10 nm 以下での3次元微細加工技術を駆使した研究は残念ながらアカデミアでは困難であることにも起因している。そこで、「2次元集積回路基盤技術として将来的に価値あるアカデミアで可能な基礎研究は何か」ということを様々な角度から検討してきた結果、サファイア基板上にヘテロエピ成長させた2次元材料の CMOS 集積化への基盤技術の構築という結論に至った。これは、面内配向を制御できず多結晶となるアモルファス SiO_2/Si 基板と異なり、3回対称の c 面サファイア表面構造を利用することで理論上ヘテロエピによる全面単結晶化が可能なこと、産業利用できる 300 mm サイズのウエハが入手可能なことを特徴としており、最先端ロジックにおける集積回路基盤技術の蓄積に貢献するだけでなく、ウエハスケールでの将来的な電子デバイス展開も期待できることが強みである。このような大面積成長には、簡便さから殆どの大学で利用されている粉末ソース CVD は厳密な蒸気圧制御が困難なため不適であり、MOCVD のようなガスソースが必須となる。

本講演では、NIMS の佐久間らが MOCVD により2インチサファイア基板上に 180°ドメインのみを持つ単層 MoS_2 を用いて、直接トップゲート FET を形成しデバイス特性を評価した結果を紹介する。サファイア基板上の FET 特性の現状・課題を明確にすることで、将来展望を議論したい。



Possible applications of 2D material devices and related integration challenges

imec, Tom Schram

E-mail: tom.schram@imec.be

The introduction of 2D materials allows a range of applications and prospects for future devices. Graphene based devices enable sensing and optical applications ranging from light sensing to optical waveguides. Due to their specific properties, metal dichalcogenides (MX_2) like MoS_2 , WS_2 and WSe_2 are major candidates for replacement of Si for future scaled devices, including future CFET devices.

Some of these properties impose specific restrictions on the device architecture and the used integration methods, such that the typical integration used for Si based devices can no longer be used. These challenges will be discussed with the accompanying solutions.

In the first part of the presentation, the integration of a single sheet MX_2 based device will be discussed, restricting the options to future proof 300 mm Si fab compatible processes compatible with scaled devices. They can be summarised as: absence of a reliable junction doping method, the need for a dedicated contact technology, limited adhesion due to the Van der Waals nature, increased sensitivity for wet delamination, oxidation and surface sensitivity of the single or few monolayer thick MX_2 .

In the 2nd part of the presentation, an extrapolation will be made towards the extra challenges and process needs for the more complex case of a stacked nanosheet as illustrated below.

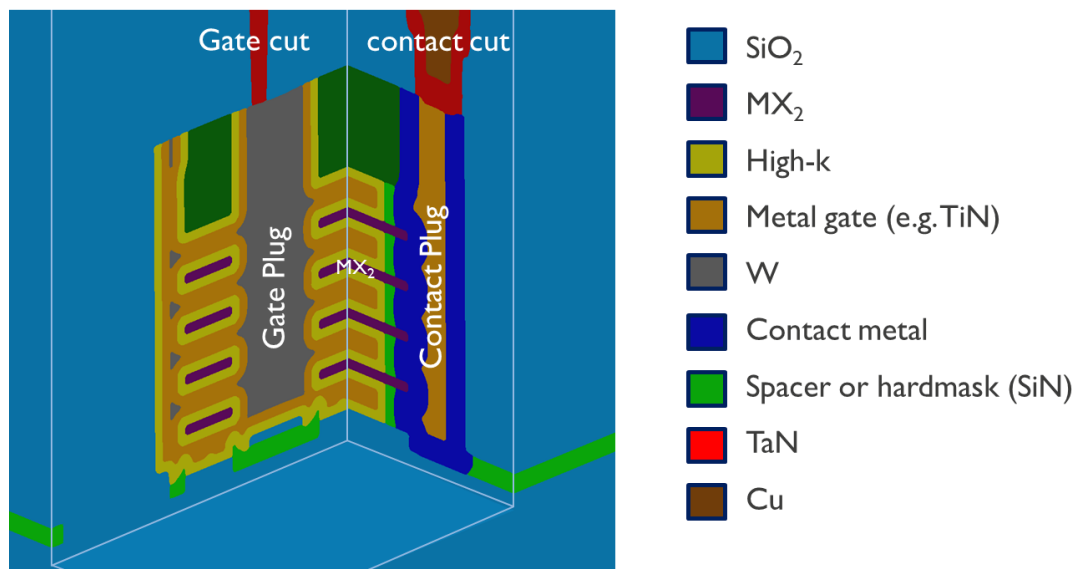


Fig: Final cross section through the gate and contact plane of a probable implementation of a 4-sheet replacement gate MX_2 based device. (SEMulator3D, <https://www.lamresearch.com/products/semulator3d/>)

Some process steps might be shared with Si technology but many of them will require adaptation to the 2D nature of the channel materials. These include: the initial stacking of the individual 2D sheets, different contact technology, mechanical integrity during the replacement gate and contact process.

新規 MO 原料を用いた TMD 成膜 TMD Film Deposition using Novel Metal-organic Precursors

小椋厚志^{1,2}、町田英明³

(1.明治大 理工、2 明治大 再生可能エネルギー研究インスティテュート、3 気相成長 (株))

A. Ogura^{1,2}, H. Machida³

(1. Meiji Univ., 2. Meiji Renewable Energy Laboratory, 3. Gas-phase Growth Ltd.)

E-mail: a_ogura@meiji.ac.jp

背景:本シンポジウムの主題である 2 次元層状材料を代表する遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD: Transition Metal Di-Chalcogenide)は、極微細ゲートによる制御が可能な超薄膜でも高いキャリア移動度を有する性質から、次世代 LSI デバイスのチャンネル材料として注目されている。一方、複雑な 3 次元構造を持つ次世代トランジスタのチャンネルに TMD を利用するためには、回り込み特性や被覆性に優れた成膜方法の確立が不可欠である。このような動機に基づき筆者らは低温で化学気相成長 (CVD: Chemical Vapor Deposition) を可能とする遷移金属 (W および Mo) とカルコゲン (S および Te) の新規有機(金属)化合物 (MO 原料)を開発し、MOCVD (Metal-organic CVD) による TMD 成膜の研究開発に取り組んできた。

実験:低温成膜が可能であり大学の実験室でも取り扱いが容易な安全性を持つことを条件に我々が新規に開発した原料は、Fig.1 にそれらの化学構造を示す n-BuNC-W(CO)₅、i-Pr₂DAD-Mo(CO)₃、t-Bu₂S₂、i-Pr₂Te であり、MOCVD では原料はすべてキャリアガスによるバブリング法でベースをターボポンプ排気が高真空に保った成長室に (一部実験では交互に= ALD: Atomic Vapor Deposition) 供給し、概ね 450℃を

上限とする温度に保った平坦および fin 状に加工した Si(001)基板上に成膜した。得られた TMD 膜は、透過電子顕微鏡(TEM)、ラマン分光法(励起波長:532 nm)、X 線光電子分光法(XPS)等により評価した。

結果:断面 TEM 像で確認した平坦基板上的 TMD 膜は成長当初は表面に平行な層状の構造を持ち、概ね 10 層を超える膜厚から一部縦方向成長が始まった。ラマン分光測定でも層状 TMD に特有なピークが見られ、XPS で確認した組成は概ね化学量論に一致し、かつ 6 か月程度の保管による変化は少なかった。トレンチ基板上的 WS₂ 膜を Fig. 2 に例示したように、回り込み特性は良好で、fin 上部、角部、側壁部にもそれぞれ基板形状に沿った平行な成膜が確認された。

謝辞:本研究の一部は、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点事業 JP011438 の助成を受けたものである。

参考文献:

- [1] M.-Y. Li *et al.*, Proc. IEEE Symp. on VLSI Tech. and Cir., p.290 (2022).
- [2] K. Cho *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SG1048 (2023).

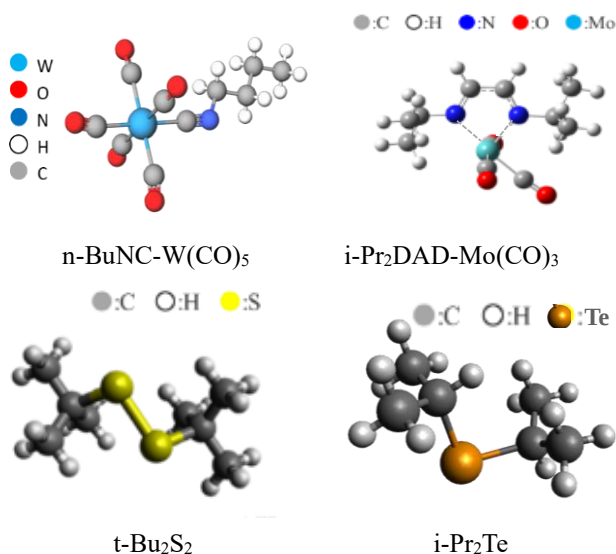


Fig.1 Chemical structure of novel precursors for TMD.

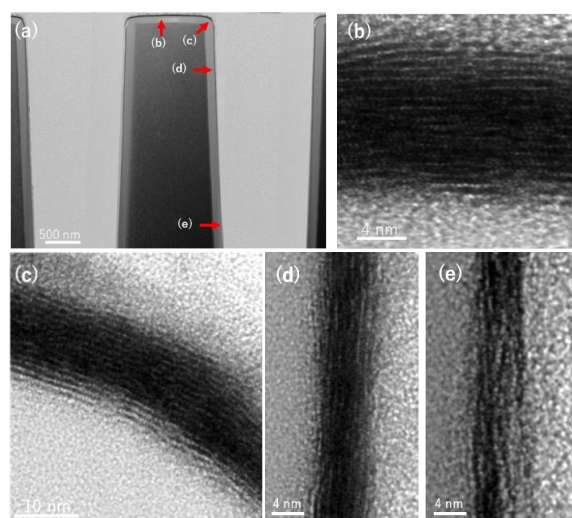


Fig. 2 TEM images of WS₂ film deposited on fin structure.

二次元ヘテロ構造を舞台とした量子マテリアル・機能創出

Two-dimensional-heterostructures for functional quantum materials

物料機構 MANA, 北大総合 北浦 良

National Institute for Materials Science MANA, Hokkaido Univ.

E-mail: KITAURA.Ryo@nims.go.jp

カーボンナノチューブ、グラフェン、窒化ホウ素 (hBN)、遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD、図 1) などの低次元材料は、ナノスケールでの新しい科学を探索するための魅力的なプラットフォームを提供してきた。とくに近年の二次元(2D)系の発展は著しく、物質科学の一大トピックスとして基礎・応用を巻き込んだ展開を見せている。これには、個々の 2D 物質が興味深い物性をもつことに加えて、それらが構成要素となりさまざまなヘテロ接合、ヘテロ積層、超格子などのナノ構造へと展開できるという点が大きな役割を果たしている。そのような背景のもと、我々は薄膜成長技術（有機金属化学気相成長法 (MOCVD) や分子線エピタキシー法 (MBE)）による結晶成長や乾式転写法を用いることでさまざまな低次元超構造、特に 2 次元半導体ベースのヘテロ構造を作製する研究を行ってきた^{[1]-[6]}。これらヘテロ構造は、さまざまな量子機能を生み出す舞台として優れていることに加えて、本シンポジウムのテーマである電子デバイス応用にもつながりうる。本講演では、我々の二次元ヘテロ構造を舞台とした量子マテリアル・機能創出に関する最近の成果を紹介しつつ、2 次元材料の電子デバイスへの展開に関する話題にも少し触れたい。

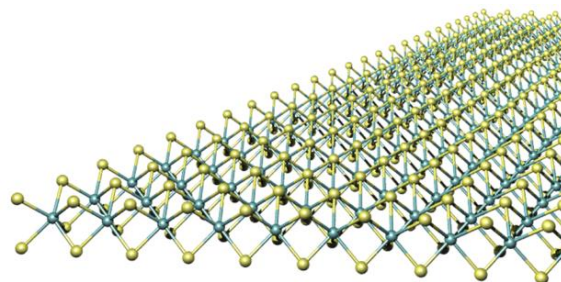


Fig. 1. A ball-and-stick representation of a monolayer transition metal dichalcogenide. Green and yellow balls correspond to transition metal (Mo, W, etc) and chalcogen (S, Se, Te) atoms, respectively.

References:

- [1] M. Xue, et., al., Appl. Phys. Lett. 123 6 (2024)
- [2] Y. Urano, et., al., Appl. Phys. Exp. 16 (6), 065003 (2023)
- [3] S. Zhang, et., al., Nanoscale 15 (12) 4570 (2023)
- [4] T. Hotta, et., al., Appl. Phys. Exp. 16 (1) 015001 (2022)
- [5] Y. Murai, et., al., ACS Nano 15(12) 19225 (2021)
- [6] T. Hotta, et. al., ACS Nano, 15, 1, 1370-1377 (2021)

ファンデルワールス複合原子層の自在配列と素子応用に向けて

Fabrication and applications of van der Waals junctions of 2D materials

東京大学生産技術研究所 町田 友樹

Institute of Industrial Science, University of Tokyo Tomoki Machida

E-mail: tmachida@iis.u-tokyo.ac.jp

The most distinct feature of van der Waals (vdW) junctions of 2D materials is controllability of twist angle between the crystals, which modulates the band structure and material properties. Here, we demonstrate that the spatial inversion symmetry and hence the spin splitting in band structure can be controlled by vdW assembly. Twisted bilayer WTe₂ with twist angle $\theta_{\text{twist}} = 0^\circ$ and 180° are investigated. The intensity of second harmonic generation changes by two orders of magnitude depending on θ_{twist} , indicating that 1L WTe₂ + 1L WTe₂ (0°) possesses the spatial inversion symmetry, whereas 1L WTe₂ + 1L WTe₂ (180°) lacks the inversion symmetry. The electronic structure of the 1L WTe₂ + 1L WTe₂ are significantly modulated by θ_{twist} . The spin splitting emerges when $\theta_{\text{twist}} = 180^\circ$ due to the broken inversion symmetry.

Few-layer transition metal dichalcogenides (TMDs) exhibit subband quantization induced by the out-of-plane quantum confinement of the wavefunctions, i.e., a few-layer TMDs is a naturally-formed quantum well (QW). Using momentum-conserved resonant tunneling, we investigate the QW states in 4L-WSe₂/h-BN/4L-WSe₂ vdW tunnel junctions with tunnel twist angles θ_{tunnel} . Current-voltage characteristics exhibit multiple resonant tunneling peaks whose positions shift as θ_{tunnel} was varied over the $0-60^\circ$ range, which indicated the presence of a spin-polarized subband crossing and a saddle point. Our twist-controlled resonant tunneling approach overcomes the difficulties associated with momentum-resolved electronic structure measurements and reveals the unique vdW-QW states in the conduction band of multi-layer WSe₂.

- [1] Y. Zhang, K. Kamiya, T. Yamamoto, M. Sakano, X. Yang, S. Masubuchi, S. Okazaki, K. Shinokita, T. Chen, K. Aso, Y. Y.-Takamura, Y. Oshima, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, T. Sasagawa, K. Ishizaka, and T. Machida, Nano Lett. **23**, 9280 (2023)
- [2] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, and T. Machida, Nano Lett. **22**, 4640 (2022).
- [3] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, and T. Machida Phys. Rev. Research **5**, 043292 (2023).
- [4] S. Kawasaki, K. Kinoshita, R. Moriya, M. Onodra, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, and T. Machida Phys. Rev. Research (in press).

オプティカルデバイスに向けた光応答分子・溶液と 2D 物質との複合材料 Photochromic Molecule in Solution Combined with 2D Material FET for Optical Device

東北大多元研、米田忠弘 高岡毅

Tohoku Univ., Tadahiro Komeda and Tsuyoshi Takaoka

E-mail: tadahiro.komeda.a1@tohoku.ac.jp

オプティカルデバイスと MOS デバイスの融合はシリコンベースの論理回路の限界を越えていくために必要な技術の一つと考えられる。前者で高い光応答を得るためには現状の微細加工技術とは異なった材料とプロセスが必要となるが、特に光への応答性の高い、光異性化などを伴う分子の光反応、あるいは遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)層状物質を原子層薄膜としたときに得られる直接遷移型の電子励起が可能なバンド構造などを利用することに注目が集まる。本報告ではシリコン技術と融合を目指した、TMD 原子層膜をチャンネルとして用いた電界効果トランジスタと、溶液中の光異性化分子を組み合わせるオプティカルデバイスの動作原理を検証した最近の研究を報告する。

Figure 1 はその概念図であり、TMD 原子層をチャンネルとして用いた FET デバイスに微小溶液分析に用いられるマイクロ流路を組み合わせたデバイスに、光照射をおこなう。光異性化分子を含む溶液を用いることで、特定の波長に反応する化学反応を利用可能であり、このことで複雑な光を利用した論理回路構築が可能である。

吸着分子の化学変化が、FET 特性の変化として検知可能かは興味深い。特に、Figure 2(a)に示すような、フォトクロミック Spiropyrans (SP)分子と Merocyanine (MC)の可逆的変化が電流特性変化として捉えられれば、光を用いた演算にも発展する。SP/MC の可逆的変化は溶液中ではよく調べられている。チャンネル上においても、SP 分子を堆積した後、光照射で MC 分子に変化させ、熱印加によって SP 分子に戻すサイクルが可能である。その変化を FET 特性の変化可能であることが検証されている。Figure 2 (b)に示すのは SP 分子・MC 分子間の可逆的サイクルを FET のドレイン電流変化で検知したものである。よりアクセプター性の強い SP 分子状態の場合、ゲート電圧-ドレイン電流曲線はより右にシフトして観察され、しきい値の変化で表現すると (Figure 2(c)) 2つの分子間のサイクルを忠実に再現していることがわかる。さらに温度変化を測定することで、活性化エネルギーが測定可能であり、それが単層膜と多層膜で異なることが示された。従来この変化を単層以下の薄膜で捉えるには大掛かりな装置たとえばシンクロトロン X 線吸収分光が必要であったが、ミクロン単位のデバイスを用い、かつ電気特性のみで少数分子の化学反応を検知したことが注目される。

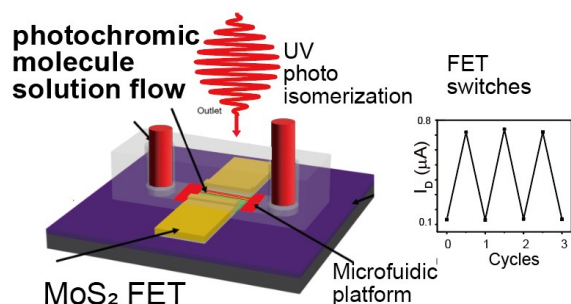


Fig.1. Schematics of TMD-FET combined with microfluid platform. Solution with photochromic molecule is delivered to a target channel.

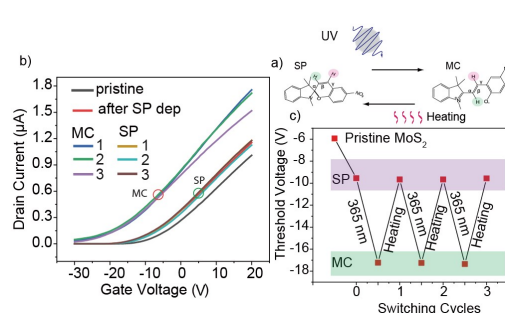


Fig.2. (a)Photochromic reaction. (b)MoS₂ FET property change with molecule adsorption. (c) Cycles of photochromic changes.

【本

研究は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業（課題番号 JPMXP1224NM0062 と JPMXP1224TU0052）の支援を受けています】