

Oral presentation | 17 Nanocarbon and Two-Dimensional Materials : 17.3 Layered materials

📅 Fri. Sep 20, 2024 9:00 AM - 12:00 PM JST | Fri. Sep 20, 2024 12:00 AM - 3:00 AM UTC 🏢 A31 (TOKI MESSE 3F)

[20a-A31-1~11] 17.3 Layered materials

Tomo-o TERASAWA(JAEA)

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[20a-A31-1]

Interface and Surface Analysis of WS₂/Graphene Heterostructures on SiC substrate

○Yui Ogawa¹, Ufuk Erkilic¹, Shengnan Wang¹, Yoshitaka Taniyasu¹ (1.NTT BRL)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award ◆ English Presentation

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[20a-A31-2]

Quasi-one-dimensional moiré in large-angle twisted bilayer WTe₂

○Xiaohan Yang¹, Limi Chen², Yijin Zhang¹, Kohei Aso², Wataru Yamamori³, Rai Moriya¹, Kenji Watanabe⁴, Takashi Taniguchi⁴, Takao Sasagawa³, Yukiko Yamada-Takamura², Oshima Yoshifumi², Tomoki Machida¹ (1.IIS Univ. Tokyo, 2.JAIST, 3.Tokyo Tech., 4.NIMS)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[20a-A31-3]

Observation of phase transformation and domain wall dynamics of ferroelectric SnS thin film by POM

○Satsuki Kitamura¹, Nanae Ryo¹, Nishimura Tomonori¹, Kanahashi Kaito¹, Nagashio Kosuke¹ (1.UTokyo)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[20a-A31-4]

TEM atomic resolution analysis of effect of interface layer on crystallographic orientation of MoS₂ on sapphire substrate

○Emi Kano¹, Toshiki Yasuno¹, Xu Yang¹, Yoshiki Sakuma², Nobuyuki Ikarashi¹ (1.Nagoya Univ., 2.NIMS)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[20a-A31-5]

Study on the generation of bubble structure depending on polymer stamp pressing conditions

○(M1)Daichi Kokubo¹, Ayumi Shimizu¹, Kou Aoyagi¹, Hiroyuki Mogi¹, Yusuke Arashida¹, Shoji Yoshida¹, Osamu Takeuchi¹, Hidemi Shigekawa¹ (1.Univ. of Tsukuba)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[20a-A31-6]

The influence of exfoliation implemented with Au on layered materials like graphene

○Aoi Hamada^{1,2}, Chao Tang^{1,3}, Koichi Tamura^{1,2}, Akira Sato¹, Taiichi Otsuji¹ (1.RIEC, Tohoku Univ., 2.Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 3.FRIS, Tohoku Univ.)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[20a-A31-7]

Patterning of Layered Semiconductor GeS₂ by Laser Photo-Oxidation

○(M2)Shohi Tahara¹, Keiji Ueno², Ryo Nouchi¹ (1.Osaka Metro. Univ., 2.Saitama Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award ◆ English Presentation

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[20a-A31-8]

Atomic Layer Etching of the Quantum Spin Hall Insulator WTe₂ Towards the Study of Topological Josephson Junction Devices

○(P)Michael Daniel Randle¹, Russell Deacon^{1,3}, Manabu Ohtomo², Masayuki Hosoda², Kenji Watanabe⁴, Takashi Taniguchi⁵, Shota Okazaki⁶, Takao Sasagawa⁶, Kenichi Kawaguchi², Shintaro Sato², Koji Ishibashi^{1,3} (1.Advanced Device Laboratory, RIKEN, 2.Fujitsu Research, Fujitsu Ltd., 3.RIKEN Center for Emergent Matter Science (CEMS), 4.Research Center for Electronic and Optical Materials, NIMS, 5.Research Center for Materials Nanoarchitectonics, NIMS, 6.Laboratory for Materials and Structures, TIT)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[20a-A31-9]

Development of a Spatially Selective Patterning Method for Janus TMDs

○DINGKUN BI^{1,2}, Weizi Lu^{1,2}, Soma Aoki^{1,2}, Tianyishan Sun^{1,2}, Hiroto Ogura^{1,2}, Toshiaki Kato^{1,2} (1.Grad. Sch. of Eng., Tohoku Univ., 2.AIMR, Tohoku Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[20a-A31-10]

Intercalation of Metal Atoms into W₆Te₆ Atomic Nanowires and The Optical Properties

○(D)Ryusuke Natsui¹, Yusuke Nakanishi¹, Zheng Liu², Nguyen Tuan Hung³, Yung-Chang Lin², Takahiko Endo¹, Kazu Suenaga⁴, Riichiro Saito³, Yasumitsu Miyata¹ (1.Tokyo Metropolitan Univ., 2.AIST, 3.Tohoku Univ., 4.Osaka Univ.)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[20a-A31-11]

Characterization of excitonic properties of anisotropic monolayer MoS₂ Suspended Structures

○(M1)Ko Aoyagi¹, Daichi Kokubo¹, Ayumi Shimizu¹, Mogi Hiroyuki¹, Yusuke Arashida¹, Shoji Yoshida¹, Osamu Takeuchi¹, Hidemi Shigekawa¹ (1.Univ. of Tukuba)

SiC 基板上に直接成長した WS₂/グラフェンヘテロ構造の構造解析Interface and Surface Analysis of WS₂/Graphene Heterostructures on SiC substrate

NTT 物性科学基礎研 ○小川 友以、Ufuk Erkilic、Shengnan Wang、谷保 芳孝

NTT BRL ○Yui Ogawa, Ufuk Erkilic, Shengnan Wang, Yoshitaka Taniyasu¹

E-mail: yui.ogawa@ntt.com

半導体デバイスのさらなる高性能化や微細化・集積化の要求が高まる中、異なる原子層二次元物質(2D 物質) を組み合わせたヘテロ構造の応用が注目されている。2D 物質のヘテロ構造の作製法では機械的剥離-転写法が一般的であるが、デバイス応用に向けては大面積化や清浄なヘテロ界面の形成が可能な直接成長法によるヘテロ構造の作製が望まれる。デバイス作製技術の確立には、アニール等の作製プロセスが積層構造や界面状態に与える影響の理解が重要である。そこで本研究では、大口径ウエハが実用化している SiC 基板上に直接成長法により二硫化タングステン(WS₂)/グラフェンヘテロ構造を作製し、表面・界面構造に対するアニールの影響を調べたので報告する。

熱分解法により作製したバッファ層/4H-SiC(0001)基板界面を水素終端して得たグラフェン上に、WO₃ と S を原料とした化学気相成長(CVD)法で大気圧にて WS₂ を成長させた。その後、直接成長で得た WS₂/グラフェンヘテロ構造を超高真空(UHV)中 (5.0×10^{-9} Torr 以下)300°Cでアニールし、低速電子線回折 (LEED) (室温) および走査型トンネル顕微鏡 (STM) (5K) にて評価した。

アニール前の WS₂/グラフェンヘテロ構造の LEED パターンでは、WS₂・グラフェン・SiC の回折がそれぞれ観測され、WS₂ はグラフェンに 0°および 30°の方位に配向成長していることが分かった (図(a))。一方、アニール後の LEED パターン (図(b)) では、赤矢印で示すサテライトパターンが現れ、グラフェン/SiC 基板間では $6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3}$ 再構成が起きていることが示唆された。STM 観察像において WS₂ の原子像 (格子定数 0.32nm) が得られる観察条件 ($V_{tip} = 1.5$ V, $I_t = 250$ pA) でモアレ超格子の周期を測定したところ、アニール前は 1.2 nm と WS₂/グラフェンの 0°回転のモアレ超格子に一致し (図(c))、アニール後は 1.8 nm と異なるモアレ超格子が観察された (図(d))。界面の再構成によりグラフェンは SiC 基板と強い相互作用を有し、WS₂/SiC 基板のモアレ超格子が観察されたと考えられ、LEED パターンの変化とも合致する結果であった。以上の結果は、SiC 基板表面が WS₂/グラフェンヘテロ構造で覆われた状態においても、UHV アニールによってグラフェン/SiC 界面を終端する水素の脱離が進行することを示唆している。

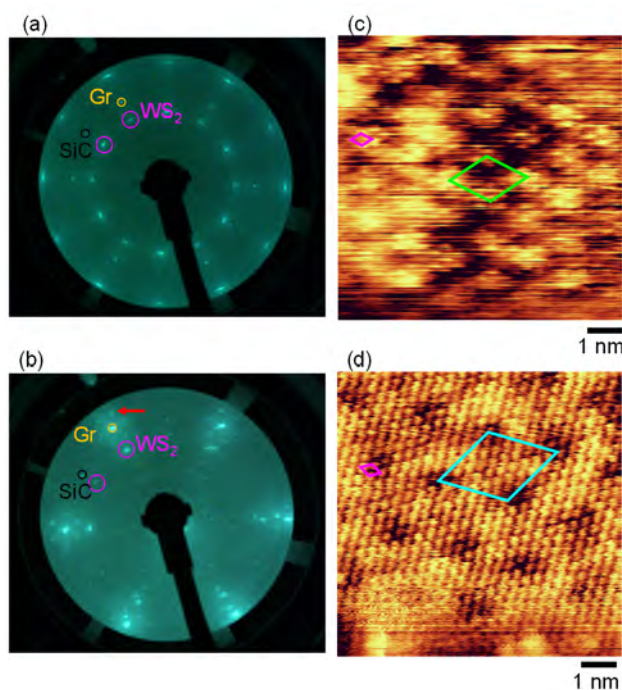


Fig. (a), (b) LEED patterns and (c), (d) STM topography images of WS₂/graphene heterostructure on the SiC substrate. (a) and (c) were taken from as-grown sample, and (b) and (d) were taken after UHV annealing. A red arrow in (b) indicates $(6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3})R30^\circ$ reconstruction. In the STM images in (c) and (d), WS₂ lattice is marked by pink and moiré superlattice are marked by green and light blue lines respectively.

高角度ツイスト WTe_2 における擬一次元モアレの観測Quasi-one-dimensional moiré in large-angle twisted bilayer WTe_2 東大生研¹, 北陸先端大², 東工大³, 物材機構⁴○楊 瀟涵¹, 陳 麗米², 張 奕勁¹, 麻生 浩平², 山森 亘³, 守谷 頼¹,渡邊 賢司⁴, 谷口 尚⁴, 笹川 崇男³, 高村(山田) 由起子², 大島 義文², 町田 友樹¹IIS Univ. Tokyo¹, JAIST², Tokyo Tech.³, NIMS⁴○Xiaohan Yang¹, Limi Chen², Yijin Zhang¹, Kohei Aso², Wataru Yamamori³,Rai Moriya¹, Kenji Watanabe⁴, Takashi Taniguchi⁴, Takao Sasagawa³,Yukiko Yamada-Takamura², Yoshifumi Oshima², Tomoki Machida¹

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

Moiré effects in two-dimensional twisted bilayer systems are attracting great interests owing to the emergence of novel electronic structures and physical properties. Studies of moiré effects are, so far, mostly conducted at small twist angles, because the increase of twist angle quickly suppresses the size of moiré pattern caused by lattice. Here, we report an experimental discovery of quasi-one-dimensional (1D) moiré patterns in twisted bilayer tungsten ditelluride (tB- WTe_2) with large twist angles of 58° and 62° . Interestingly, the two quasi-1D moiré patterns at 58° and 62° are orthogonal to each other. We further elucidated the transformation between two quasi-1D moiré patterns through an intermediate 2D moiré pattern at 60° . Our results propose tB- WTe_2 as a novel platform for studying one-dimensional physics.

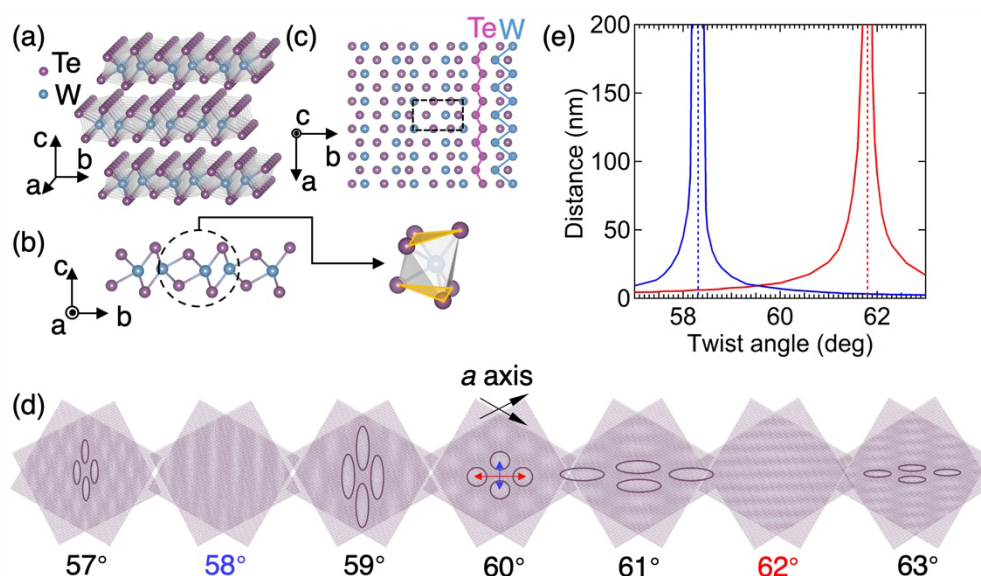


Figure 1. Schematics of WTe_2 and twisted bilayer WTe_2 . (a) Crystal structures of T_d phase bulk WTe_2 . (b) Side view of monolayer WTe_2 . (c) Top view of monolayer WTe_2 . The dashed rectangle indicates the unit cell. (d) Schematics of twisted bilayer WTe_2 with twist angles ranging from 57° to 63° . The solid circles indicate the pale regions. Red and blue arrows indicate the lateral and vertical distance of adjacent pale regions, respectively. (e) Relationship between twist angle and the distance of adjacent pale regions.

偏光顕微鏡による強誘電 SnS 薄膜の構造相転移とドメイン壁の動的挙動観察

Observation of phase transformation and domain wall dynamics of ferroelectric SnS thin film by POM

東大マテリアル ○来村 颯樹, 名苗 遼, 西村 知紀, 金橋 魁利, 長汐 晃輔

UTokyo ○S. Kitamura, R. Nanae, T. Nishimura, K. Kanahashi & K. Nagashio

Email: kitamura-satsuki697@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

【緒言】

2次元層状材料 SnS は、図1のように室温で安定な反強誘電 α 相の他に、高温相として対称性が増加する常誘電 β 相や結晶成長時の歪導入により形成される準安定の強誘電 β' 相が存在する。我々は、空間反転対称性の破れを有する β' 相に関して、バルク光起電力効果を実証し^[1]、強誘電ドメインの存在を明らかにしてきた^[2]。強誘電ドメインの温度制御は重要であるが、 β' 相が α 相となり強誘電性が消失するキュリー温度(T_c)は、理論的には室温以上^[3]と予想されているのみで、実験的には厳密な値は定まっていない。また、 α 相から β 相への構造相転移温度($T_{\alpha/\beta}$)といった SnS の相転移の理解も乏しい。

20 nm 程度の SnS 結晶の偏光顕微鏡観察においては、複屈折ではなく結晶方位の反射率の違いにより強誘電ドメイン構造を観察できる^[2]。本研究では、加熱ステージ付きの偏光顕微鏡で SnS 相転移を観察し、相転移とドメイン壁の動的挙動を理解することを目的とした。

【結果及び考察】

PVD 成長によって Mica 基板上に厚さ~20 nm の SnS を成長させ h-BN を被せた後、偏光顕微鏡で観察しながら 500°C まで 10°C/min で昇温し 500°C で 2 分保持した後同じ速度で冷却した。図2(a)の様に 40°C で観察されたドメインが 500°C で消失した。この時、結晶頂点の角度が 87 度から 90 度増加したことから、対称性の高い β 相に相変態したと理解できる。一方、40°C まで冷却するとドメインは再度出現し、ドメイン壁の移動、及び頂

点角度が 87 度に戻ることを確認した。ここで、20°C ほどの写真の RGB 値から隣り合うドメインの R 値を抽出したのが図2(b)である。450~500°C 付近で隣り合うドメインの R 値が同程度になるのが確認された。つまり、結晶方位が一致したことを示唆している。よって 450~500°C で α/β 構造相転移していることが考えられ、バルク粉末の熱量計測で決定された $T_{\alpha/\beta}=600^\circ\text{C}$ よりも 100°C 以上低いことが分かった。次にキュリー温度について考える。SnS を 50°C 刻みでアニールし、室温でラマン測定を行ったところ、 α 相と β 相の両方の面内振動である約 185cm^{-1} のピーク強度が増減を繰り返した(図3)。ピーク強度の著しい減少は β 相の消失を意味する一方で、300°C でのアニールにより再びピーク強度が RT と同程度となることから、冷却中に β 相が再び出現したことが示唆される。PVD 成長時の準安定 β' 相の形成機構は不明であったが、400°C の成長温度において、安定 α 相が先に形成されていても冷却中に β 相が基板もしくはドメイン壁により導入される歪により形成し得ることを示唆している。 T_c の厳密な同定には昇温時にラマン測定等その場観察手法を適応する必要がある。

今回昇温時の偏光顕微鏡観察により、 α/β 相転移及びドメイン壁の動的変化挙動の観察に成功した。ラマン分光法などの光測定を組み合わせることで T_c の厳密同定が可能になる。

【参考文献】

[1] Y.-R. Chang, S. Kitamura, *et al.*, Adv. Mater., 2023, 35, 2301172. [2] R. Nanae, S. Kitamura, *et al.*, Adv. Funct. Mater., in revision. [3] M. Wu, *et al.*, Nano Lett., 2016, 16, 3236.

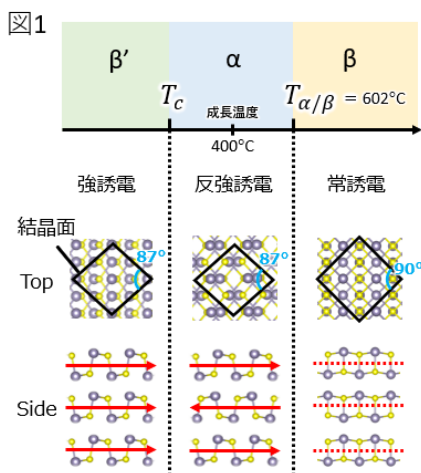


図1. 3種類の相の誘電性と結晶構造。

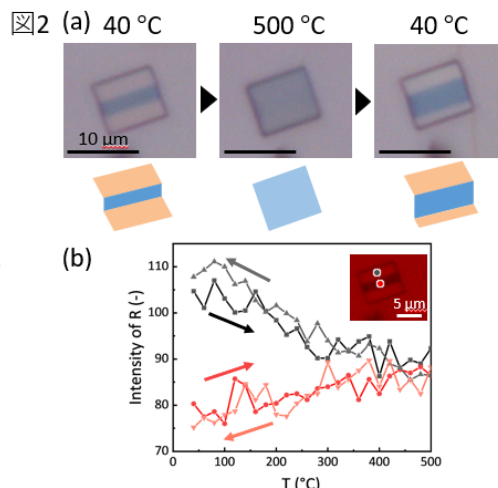


図2. (a)各温度におけるドメイン構造, (b)二つのドメインの R 値の温度依存性。

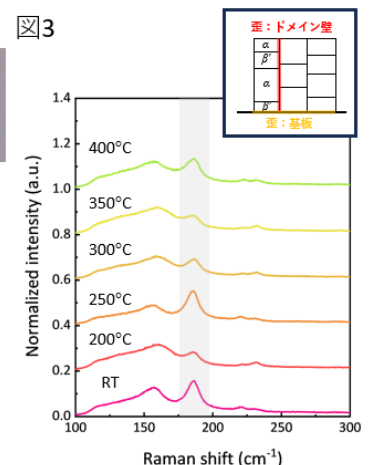


図3. 各温度でのアニール後のラマン測定。

MOCVD-MoS₂/sapphireの結晶方位に界面層が与える影響のTEM解析

TEM atomic resolution analysis of effect of interface layer on crystallographic orientation of MoS₂ on sapphire substrate

名古屋大¹, NIMS² ○狩野絵美¹, 安野寿輝¹, 楊旭¹, 佐久間芳樹², 五十嵐信行¹

Nagoya Univ.¹, NIMS², ○E. Kano¹, T. Yasuno¹, X. Yang¹, Y. Sakuma², N. Ikarashi¹

E-mail: kano@imass.nagoya-u.ac.jp

【はじめに】二硫化モリブデンMoS₂を次世代FETのチャネル材料として用いるため、欠陥の少ない単結晶膜の成膜技術の開発が進められている。本実験では、MOCVDを用いたサファイア基板上的MoS₂エピタキシャル成長について、界面構造がMoS₂膜の配向性に与える影響を解明することを目的とし、多結晶膜と単結晶に近いMoS₂単層膜のTEM平面・断面構造解析を行った。

【実験】単層MoS₂をサファイア(0001)基板上にMOCVD法で成膜した。基板温度850℃で多結晶膜が、975℃で単結晶に近い膜が形成される(後述結果参照)。XRD測定結果は、いずれのMoS₂膜においても、サファイアのa方向とMoS₂のa方向が一致する方位の結晶粒が広い面積を占めることを示している。これらの試料の平面・断面TEM観察を行った。

【結果・考察】多結晶膜の平面観察像(Fig. 1(a))では、サファイアと方位の一致するMoS₂結晶粒が明るく観察されている。電子回折図形(Fig. 1(a)挿図)は、この多結晶膜が約10°ずつ方位の異なる回転ドメインで形成されていることを示している。一方、単結晶膜の観察像(Fig. 1(b))は一様な明るさで観察されており、回転ドメインの割合が1%以下であった。これらの膜の断面観察において(Fig. 1(c)(d))、多結晶膜にはMoS₂とサファイアの間HAADF-STEM像の強度ピークが観察されるが(Fig. 1(c)挿図)、単結晶膜にはこのようなピークは観察されなかった(Fig. 1(d)挿図)。以上の結果は、多結晶膜で観察された界面層がMoS₂の配向性に影響を与えることを示唆している。

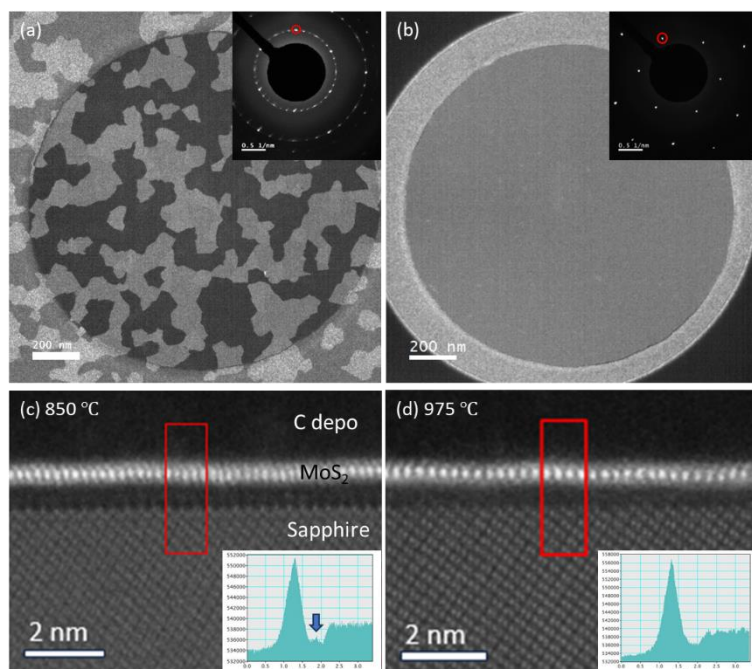


Fig. 1 (a), (b) DF-TEM images of MoS₂ films synthesized at 850 °C and 975 °C, respectively. Inset images show diffraction patterns. DF-TEM images were generated using an objective aperture to select the diffraction peak as indicated by the red circles in the diffraction patterns. (c), (d) Cross-sectional HAADF-STEM images of MoS₂/Sapphire synthesized at 850 °C and 975 °C, respectively. Inset images show line profiles from the red square region.

ポリマースタンプ押付条件によるバブル構造発生に関する検討

Study on the generation of bubble structure depending on polymer stamp pressing conditions

筑波大数理¹ ○小久保 大地¹, 清水 歩¹, 青柳 上¹, 茂木 裕幸¹, 嵐田 雄介¹,
吉田 昭二¹, 武内 修¹, 重川 秀実

Univ. of Tsukuba¹ °Daichi Kokubo¹, Ayumi Shimizu¹, Kou Aoyagi¹, Hiroyuki Mogi¹,

Yusuke Arashida¹, Shoji Yoshida¹, Osamu Takeuchi¹, Hidemi Shigekawa¹

E-mail: mogi.hiroyuki.fp@u.tsukuba.ac.jp, <https://dora.bk.tsukuba.ac.jp/>

次世代デバイスの材料として注目されている遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) 半導体などの層状物質を対象に、単層～数層試料を任意基板上に形成する手法として機械的剥離法が広く用いられている。機械的剥離法には乾式転写と湿式転写法の二つがある。湿式転写法では、TMD 上にスピコートしたポリマーシートを有機溶媒で除去する必要があり、これが単層 TMD を汚染する可能性がある。一方、乾式転写法は有機溶媒に曝さずに転写を行うため、TMD の汚染リスクが低いと考えられる。転写を複数回繰り返すことで層間ヘテロ構造等の多層構造を形成できるが、この時、層間に空気や不純物が閉じ込められることによりバブル構造が形成されることがある。この構造は雰囲気中にある、もしくは有機物から発生するガスや浸漬液体の侵入に起因しており、デバイスの性能を劣化させる可能性がある。先行研究では、球状突起を持つ粘弾性ポリマースタンプを用いてターゲット材料間に接触角を導入し、低速でポリマー転写を行うことで有機汚染を排除する方法が提案されている[Iwasaki, T et al, ACS Appl. Mater. Interfaces 2020, 12, 8533]。一方で、スタンプとして連続的に角度が変化する球形状を用いると、転写時の角度条件の決定が難しいという課題があると考えられる。

本研究では、粘弾性ポリマースタンプに切り込みを加える等の形状加工を施すことで基板平面に対するスタンプ角度を明確に制御することで、mm 程度のスケールで均一にスタンプ角度を決定することを目指した。図に示すように、転写機構を $\sim 10^{-4}$ Pa 程度の真空中に組み込むことにより、雰囲気気体に起因するバブル構造を抑制し、不純物の寄与を議論できる。当日は、バブル等の不均一なナノスケール構造の発生頻度等を転写角度や速度を変化パラメータとして得られた結果から議論する。

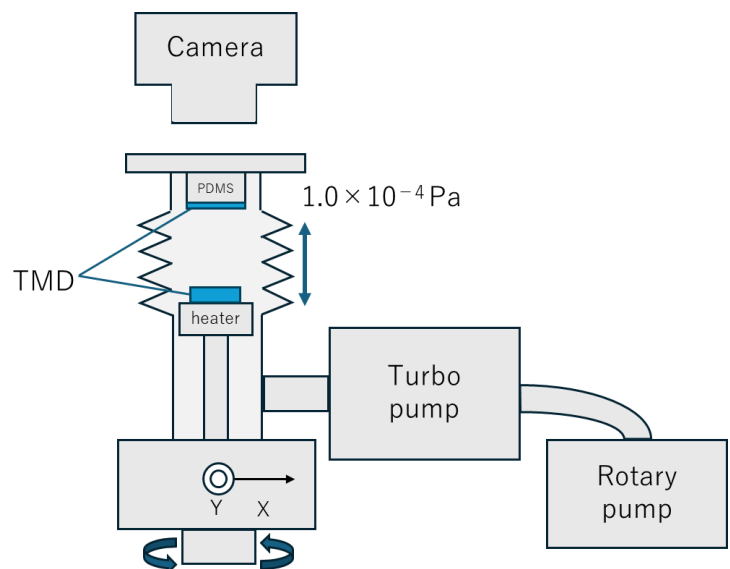


図 1 Vacuum transfer unit

金を用いた剥離法がグラフェン等層状物質の結晶品質に与える影響

The influence of exfoliation implemented with Au on layered materials like graphene

(M1) 濱田葵生^{1,2}, 唐超^{1,3}, (D) 田村紘一^{1,2}, 佐藤昭¹, 尾辻泰一¹

1. 東北大学電気通信研究所, 2. 東北大学工学研究科,
3. 東北大学学際科学フロンティア研究所

A. Hamada^{1,2}, C. Tang^{1,3}, K. Tamura^{1,4}, A. Satou¹ and T. Otsuji¹

1 RIEC, Tohoku University, 2 Graduate School of Engineering, Tohoku University, 3 FRIS, Tohoku University,

E-mail: hamada.aoi.p1@dc.tohoku.ac.jp

グラフェンをはじめとするファンデルワールス二次元材料は、秀逸な電子輸送特性と特異な光電子物性を有しており、超高速テラヘルツ (THz) 無線通信などへの応用研究が盛んに行われている[1]。代表的な二次元材料であるグラフェンには様々な成膜方法があるが、それぞれ一長一短がある。最も簡便な方法として機械的剥離法がある。機械剥離とはテープを用いてグラフィイトから直接グラフェンを剥ぐ方法である。高品質なグラフェンを安価で簡単に手に入れられる一方で、とても小さいフレークしか得られないなどの欠点がある。その欠点を補うために考案された方法が金の表面張力を用いて剥離する方法である[2]。この方法によってより大面積のグラフェンを得ることができる。具体的には材料の上に金を蒸着させ、その金を剥がすことで大面積のグラフェンを得ることができる。この時、金の蒸着スピードを速くすることで金の表面に凹凸をつくると、それによってグラフェンと金により大きな結合力が生じる[3]。結果として大面積かつ多くのグラフェンフレークを作製できる傾向を実験的に確認している。しかしこの方法はグラフェン上に直接金を成膜させるため、グラフェン品質を著しく損なう危険性がある[4]。金の成膜速度を高くすればより材料へのダメージは大きくなると考えられる。標準的なテープを用いた機械剥離とスパッタにより成膜した金を用いた剥離についてラマンスペクトルを比較した (Fig. 1)。金を用いた剥離の場合、フレークによってラマンピークは大きくばらつき、ほとんどダメージのないものもあるが総じて D バンドが大きく、G バンドも左右非対称になっていることから何らかの影響が出ていることが考えられる。本報告では、金剥離と機械剥離で得られたグラフェンやその他の層状物質について FET 特性を測定し、金剥離が物質に与えている影響について考察した結果について報告する。

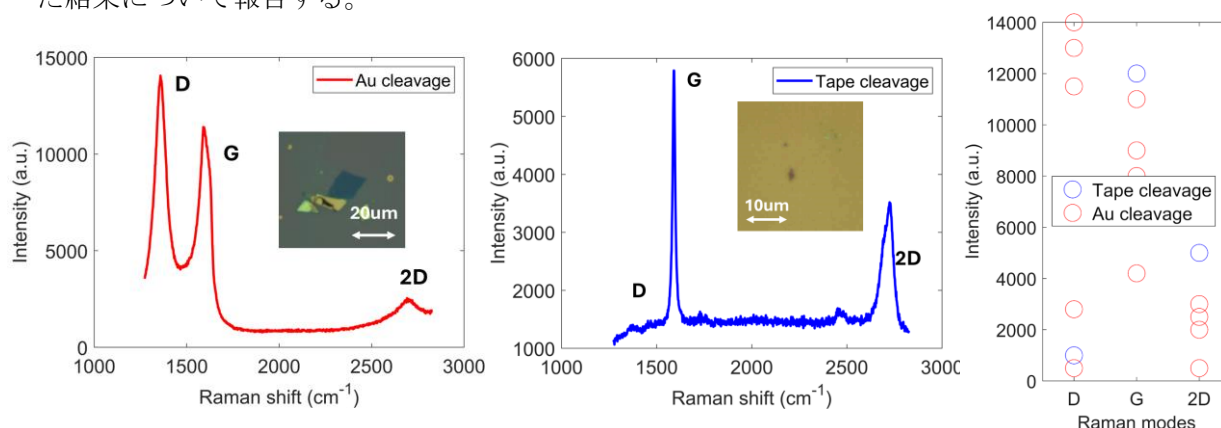


Fig.1 Raman spectra for graphene mechanically cleaved with (a) a spattered gold film, and (b) a regular tape. (c) Intensity of each Raman peaks of D, G, and 2D.

[1] F.H.L. Koppens *et al.*, **Nat. Nanotechnol.** **9**, 780 (2014).

[2] M. Heyl *et al.*, **Appl. Phys. A** **129**, 16 (2023).

[3] T. Terasawa *et al.*, **Phys. Rev. Mater.** **7**, 014002 (2023).

[4] Y. Liu *et al.*, **Nature** **557**, 696-700 (2018).

層状半導体 GeS_2 のレーザー光酸化パターンニング

Patterning of Layered Semiconductor GeS_2 by Laser Photo-Oxidation

大阪公立大院工¹, 埼玉大院理工² ^{○(M2)}田原 匠陽¹, 上野 啓司², 野内 亮¹

Osaka Metro. Univ.¹, Saitama Univ.²

^{○(M2)} Shohi Tahara¹, Keiji Ueno², Ryo Nouchi¹

E-mail: r-nouchi@omu.ac.jp

電子工学デバイスのさらなる微細化に向け、層状物質の剥離で得られる二次元半導体が注目されている。種々のデバイス構造を作製するためには、デバイス構成要素の微細加工が必要となる。リソグラフィープロセスに基づくパターンニングが従来広く用いられているが、プロセスやレジスト残渣による悪影響、スループットの低さが課題となっている[1]。また、リソグラフィーによらないプロセスとしてレーザーアブレーションがあるが、必要となるレーザーパワーが大きいため、熱による悪影響が問題となっている[2]。本講演では、二次元半導体である GeS_2 に対するリソグラフィーフリーで低レーザーパワーによるパターンニング技術として、レーザー光による局所的な光酸化と、生成された Ge 酸化物の水浸漬によるエッチングを用いたプロセスについて報告する。

ブリッジマン法で合成した GeS_2 結晶を、粘着テープを用いた機械的剥離法によって SiO_2/Si 基板上へ転写し、図 1(a)の原子間力顕微鏡 (AFM) 像で示すような薄片を得た。その GeS_2 薄片へ波長 532 nm のレーザー光を大気中で照射し、水浸漬後に再び AFM 観察を行ったところ、図 1(b)に示す通り光照射位置に穴が形成された。これは、レーザー光による局所的な光酸化と、形成された Ge 酸化物の水に対する可溶性の結果であると解釈できる。この光酸化と水浸漬に基づくエッチングは、0.26 mW のような低レーザーパワーにおいても確認できており、アモルファス GeS_2 に対するレーザーアブレーションの閾値と比して、必要なレーザーパワーは約 1/20 である。本プロセスは Ge 酸化物の水溶性を用いているため、Ge 化合物全般において適用できる可能性がある。当日は、レーザーパワー依存性や水浸漬時間依存性に加え、実際の GeS_2 のパターンニングについても報告する予定である。

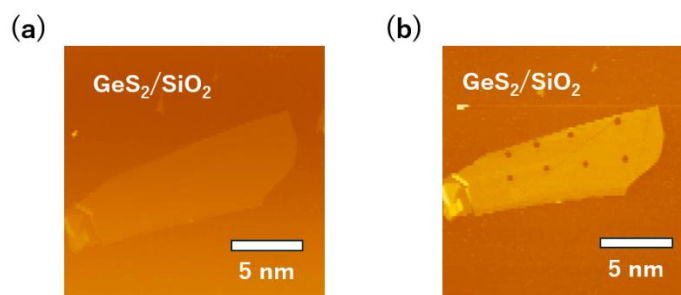


Figure 1. AFM images of GeS_2 flakes. (a) As-exfoliated. (b) After light irradiation and water immersion.

[1] Shi *et al.*, Scientific Report **13**, 2583 (2023). [2] Kim *et al.*, npj Flexible Electronics **8**, 18 (2024).

Atomic Layer Etching of the Quantum Spin Hall Insulator WTe₂ Towards the Study of Topological Josephson Junction Devices

Advanced Device Laboratory, RIKEN¹, Fujitsu Research, Fujitsu Ltd.², RIKEN Center for Emergent Matter Science (CEMS)³, Research Center for Electronic and Optical Materials, NIMS⁴, Research Center for Materials Nanoarchitectonics, NIMS⁵, Laboratory for Materials and Structures, TIT⁶, [○]Michael D. Randle¹, Russell S. Deacon^{1,3}, Manabu Ohtomo², Masayuki Hosoda², Kenji Watanabe⁴, Takashi Taniguchi⁵, Shota Okazaki⁶, Takao Sasagawa⁶, Kenichi Kawaguchi², Shintaro Sato², and Koji Ishibashi^{1,3}
E-mail: michael.randle@riken.jp

The 2-dimensional (2D), van der Waals materials have a variety of unique optical and electronic properties that have been exploited to create novel Field-Effect Transistors (FETs) and photodetectors. Weak interlayer interactions allow these materials to be isolated in the few- and monolayer limit, a state in which their properties differ significantly from the bulk. We report on an Atomic Layer Etching¹ (ALE) method for WTe₂, a 2D material that undergoes a structural phase transition in the monolayer limit and becomes a Quantum Spin Hall Insulator² (QSHI). Given the extreme air sensitivity of this material and its propensity to exfoliate into small monolayers (< 5μm), the optimization of an ALE method is critical for creating devices which exploit QSHI physics. Of particular interest are Josephson Junctions³, in which a monolayer of WTe₂ is sandwiched between s-wave superconductors. This realizes a proposed geometry for studying Majorana bound states, having applications in fault-tolerant quantum computing. We report on the applicability of our ALE method for etching large, bulk flakes into the few-layer limit as well as for making thin constrictions, which is critical for designing a Josephson Junction device.

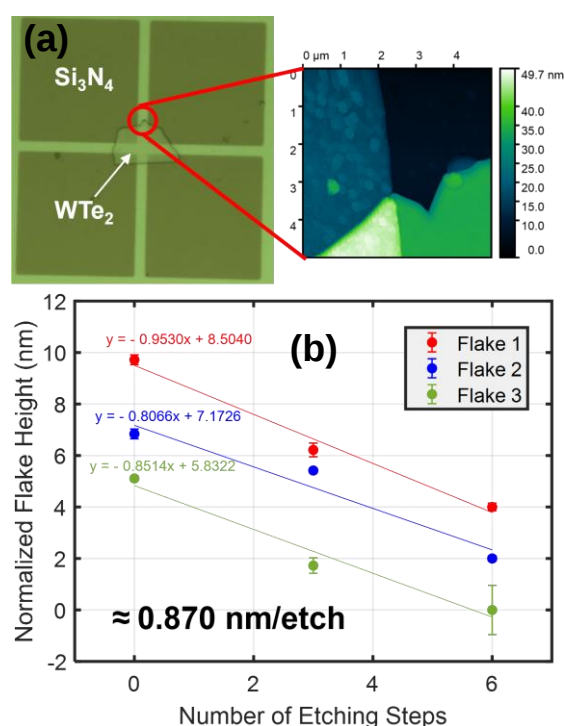


Figure 1: (a) Optical image of a bulk WTe₂ flake with AFM scan of an etched area. (b) Etch rate testing on three bulk flakes.

- [1] Li et al., ACS Nano, 10, 6836-6842 (2016)
- [2] Wu et al., Science, 359, 76-79 (2018)
- [3] Randle et al., Adv. Mater., 35, 2301683 (2023)

ヤヌス TMD の空間選択パターンニング手法の開発

Development of a Spatially Selective Patterning Method for Janus TMDs

東北大院工¹, 東北大材料科学高等研究所²,

○畢 定坤^{1,2}, 盧 衛子^{1,2}, 青木 颯馬^{1,2}, 孫 田依姍^{1,2}, 小倉 宏斗^{1,2}, 加藤 俊顕^{1,2}

Grad. Sch. of Eng., Tohoku Univ.¹, Adv. Inst. Mater. Res. (AIMR), Tohoku Univ.²

Dingkun Bi^{1,2}, Weizi Lu, Soma Aoki^{1,2}, Tianyishan Sun^{1,2}, Hiroto Ogura^{1,2}, Toshiaki Kato^{1,2}

E-mail: bi.dingkun.q1@dc.tohoku.ac.jp

上下面が異種のカルコゲン原子で構成されるヤヌス遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)は、面直方向に自発的に分極が生じることから、従来 TMD には無い新物性発現が理論的に予測されており大きな注目を集めている。しかしながら、ヤヌス TMD 合成には原子オーダーの置換反応技術が必須であり、実験研究が世界的にほとんど進展していないのが現状である。

これまで我々は、TMD の蛍光発光(PL)スペクトルをヤヌス化反応中に直接観測可能とする“その場観測ヤヌス化装置”を開発し、ヤヌス化中 TMD の PL スペクトル時間発展を取得することに成功している。この高精度ヤヌス化技術を活用することで、ヤヌス TMD ナノチューブの創成[1]、ヤヌス TMD ナノスクロールの創成[2]、およびヤヌス TMD と通常の TMD におけるヘテロ二層モアレ超格子の創成[3]を報告している。この新材料のヤヌス TMD は、空間的にパターンニングすることで様々な光電子デバイスへの応用が期待できる。しかしながら、高精度にヤヌス TMD をパターンニングする手法に関しては、多くの課題が残されているのが現状である。そこで、本研究ではヤヌス TMD の高精度パターンニング手法の開発を目的に研究を行った。

機械剥離で採取した単層二セレン化タングステン (WSe_2) に対して、フォトリソグラフィにより、レジストパターンニングを行った後、ヤヌス化プロセスを行った。その結果、フォトリソグラフィを行ったサンプルにおいては、ヤヌス化反応がほとんど進行しないことが判明した。これは、フォトレジストが TMD 表面から完全には除去できていない可能性、あるいはフォトレジストと TMD 表面が反応した可能性等が考えられる。そこで、フォトリソグラフィを用いないパターンニング手法を検討した。空間選択転写法により六方晶窒化ホウ素(h-BN)を WSe_2 に部分的に積層してヤヌス化を行った結果、露出していた WSe_2 のみが選択的に WSeS に変化することが明らかになった。この結果は、h-BN がヤヌス化反応に対する有効なマスクとなり得ることを示しており、今後 h-BN にあらかじめ微細構造をパターンニングすることで、高精度のヤヌス TMD パターンニングが期待できる。

[1] Y. Nakanishi, *et al.*, Adv. Mater. 35, 2306631-1-11 (2023).

[2] M. Kaneda, *et al.*, ACS Nano 18, 2772–2781 (2024).

[3] W. Zhang, *et al.*, Small Structures, 5 (2024), 2300514-1-8.

W₆Te₆ 原子細線への金属原子挿入と光学特性

Intercalation of Metal Atoms into W₆Te₆ Atomic Nanowires and The Optical Properties

都立大理¹, AIST², 東北大理³, 阪大産研⁴ (D1) 夏井 隆佑¹, 中西 勇介¹, 劉 嶢²,

グエン フン タン³, 林 永昌², 遠藤 尚彦¹, 末永 和知⁴, 齋藤 理一郎³, 宮田 耕充¹

Tokyo Metropolitan Univ.¹, AIST², Tohoku Univ.³, Osaka Univ.⁴, [°]R. Natsui¹, Y. Nakanishi¹, Z. Liu²,

N. T. Hung³, Y. C. Lin², T. Endo¹, K. Suenaga⁴, R. Saito³, and Y. Miyata¹

E-mail: natsui-ryusuke@ed.tmu.ac.jp

三元系遷移金属モノカルコゲナイド（三元系 TMM）は、組成が A₂M₆X₆ (M: 遷移金属, X: カルコゲン, A: アルカリ金属など) で表される擬一次元物質であり、その異方的な電子構造とディラックバンド構造から注目されている（図 1a）[1]。また、この物質は M₆X₆ ワイヤー間の A 金属の充填率や組成に依存し、低温で多様な電子状態を取る。これまで In₂Mo₆Se₆、Tl₂Mo₆Se₆ の超伝導転移、Rb₂Mo₆Se₆ の電荷密度波の形成などが研究されてきた[2]。しかし、従来の固相合成では金属挿入の制御や金属挿入による物性変化の調査は困難であった。最近、我々は化学気相成長法（CVD 法）を用い、W₆Te₆ 束の大面积成膜に成功した[3]。この W₆Te₆ 束に A 金属を挿入できれば、多彩な組成・充填率の三元系 TMM の実現が期待される。本研究では、W₆Te₆ 束を対象に、気相法による In 原子の挿入と、その構造・光学特性の評価を行った[4]。

WO₃ と Te を原料とした CVD 法により、SiO₂/Si 基板上に W₆Te₆ 束を合成した。得られた W₆Te₆ 束を In とともにガラス管に真空封入し、約 500 °C の加熱により気化した In が W₆Te₆ 束に挿入される。走査透過電子顕微鏡による原子分解能の観察により、In が 3 本の隣接する W₆Te₆ ワイヤーに囲まれていることが確認された（図 1b）。また、第一原理計算により、In 原子のワイヤー同士の積層が In 挿入によって変化することが示された。さらに、偏光ラマン分光と非共鳴ラマン計算を組み合わせることで、観測されたラマンスペクトル（図 1c）の帰属をした。今後、本研究で得られた知見をもとに、多彩な三元系 TMM の物性研究が可能になる。

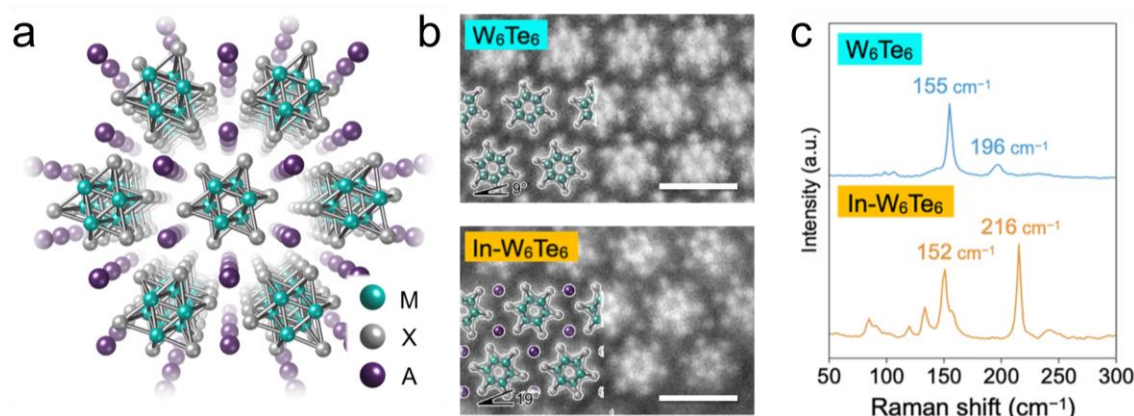


Figure 1. (a) Cross-sectional structural model of ternary TMM. (b) Electron microscopy images of W₆Te₆ bundles and In-doped W₆Te₆ bundles. Scale bars measure 1 nm. (c) Raman spectra of W₆Te₆ bundles and In-doped W₆Te₆ bundles.

[1] Q. Liu *et al.*, *Phys. Rev. X* **7**, 021019 (2017). [2] A. P. Petrović *et al.*, *Phys. Rev. B* **82**, 235128 (2010). [3] H. E. Lim *et al.*, *Nano Lett.* **21**, 243 (2021). [4] R. Natsui *et al.*, *ACS Nano* **17**, 5561 (2023).

異方的な単層 MoS₂ サスペンド構造の励起子特性評価

Characterization of excitonic properties of anisotropic monolayer MoS₂ Suspended Structures

筑波大数理¹ ○(M1)青柳 上¹, (M1)小久保 大地¹, (M2)清水 歩¹, 茂木 裕幸¹,
嵐田 雄介¹, 吉田 昭二¹, 武内 修¹, 重川 秀実¹

Univ. of Tsukuba¹ ○ Ko Aoyagi¹, Daichi Kokubo¹, Ayumi Shimizu¹, Hiroyuki Mogi¹,
Yusuke Arashida¹, Shoji Yoshida¹, Osamu Takeuchi¹, Hidemi Shigekawa¹
E-mail: mogi.hiroyuki.fp@u.tsukuba.ac.jp, <https://dora.bk.tsukuba.ac.jp/>

現在の情報処理はエレクトロニクスを基盤として成り立っている。一方で、スピントロニクスやフォトンクスなど、電荷とは異なる情報キャリアを利用し、省電力化や高性能化を目指す技術の発展も著しい。近年では、低次元材料中における励起子の活用が考えられている。励起子とは、光等で励起された電子-正孔の束縛対であり、同数の電子-正孔から構成される場合には電氣的に中性となる。さらに、光との相互作用を介して制御することが可能であり、スイッチング損失の大きな原因である高速な静電ポテンシャル変化を用いずとも伝搬のON/OFF制御が可能となる。SiやGaAs等の三次元半導体中における励起子の束縛エネルギーは数 meV と小さく、室温のエネルギーで即座に解離してしまう。一方で近年、デバイス材料として期待される単層~数層の遷移金属ダイカルゲナイド(TMDC)二次元半導体中で生じる室温安定な励起子を用いて、励起子トランジスタ動作が達成された[D.Unuchek, et al., NATURE 560, 2018.]。

しかし、励起子伝搬制御の先行研究ではh-BNやSiO₂などの基板上でのみ行われており、TMDC-基板界面のトラップ準位や不純物の影響を排除しきれない問題があった。そこで本研究では、SiO₂/Si基板中に形成した異方的な穴あきパターン上にMoS₂を転写し、サスペンドMoS₂における励起子の特性評価を行った。Fig. 1は作製した試料の蛍光(PL)顕微鏡像を示す。また、Fig. 2はサスペンド構造の上部(赤色)、中部(青)、下部(緑)でのPLスペクトルである。場所により発光スペクトルのエネルギー変化が生じていることが分かり、サスペンド構造内でエネルギー勾配が見られる。当日は、本構造における詳細な励起子エネルギー分布と合わせ、そこでの励起子の動きや形状との対応を議論する。

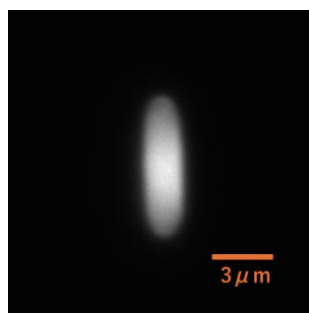


Fig.1 Fluorescence microscope image of suspended MoS₂

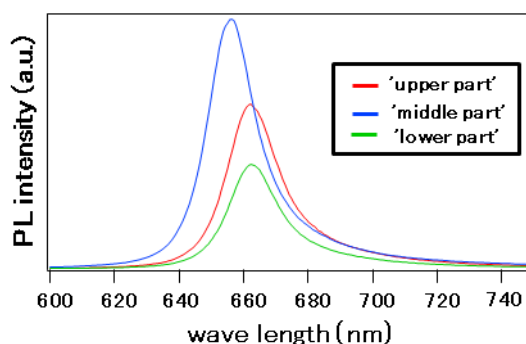


Fig2 Comparison of PL spectra within a suspended structure